



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS
MESTRADO PROFISSIONAL

OTIMIZAÇÃO DA JUNTA SOLDADA EM DUTOS DE AÇO CARBONO SUBMETIDA A CORROSÃO SOB TENSÃO

Álan Souza da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Belém

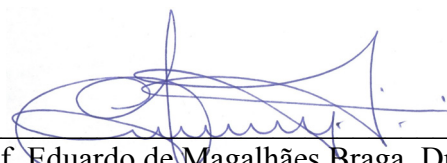
Dezembro de 2015

OTIMIZAÇÃO DA JUNTA SOLDADA EM DUTOS DE AÇO CARBONO SUBMETIDA A CORROSÃO SOB TENSÃO

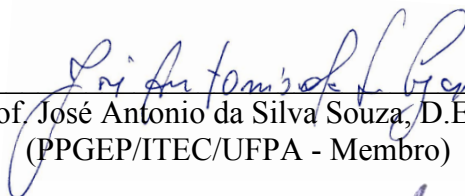
Álan Souza da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

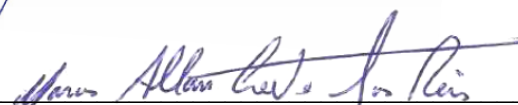
Examinada por:



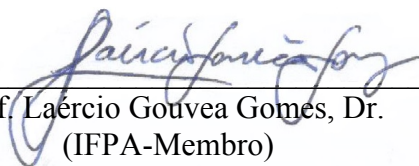
Prof. Eduardo de Magalhães Braga, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA - Orientador)



Prof. José Antonio da Silva Souza, D.Eng.
(PPGEP/ITEC/UFPA - Membro)



Prof. Marcos Allan Leite dos Reis, Dr.
(FACET/UFPA - Membro)



Prof. Laércio Gouvea Gomes, Dr.
(IFPA-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

DEZEMBRO DE 2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Silva, Álan Souza da, 1982-

Otimização da junta soldada em dutos de aço carbono submetida a corrosão sob tensão / Álan Souza da Silva. - 2015.

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Belém, 2015.

1. Soldagem. 2. Corrosão. 3. Aço-carbono. 4. Aço inoxidável. I. Título

CDD 22. ed. 671.52042

A Deus;
À minha Mãe e à minha Irmã;
À Hydro Alunorte;
Ao meu orientador.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela educação, apoio e lição de vida transmitida ao longo de toda minha caminhada.

Também dedico este trabalho a alguns amigos da Hydro Alunorte, como Aluísio Nascimento, Denilson Fernandes e Elisio Bessa, que me apoiaram e me liberaram para realizar ensaios e produzir o presente trabalho. Além deles, agradeço a todos da área da calcinação, principalmente da manutenção, que expandiram o nível de efetividade na operacionalização de atividades consideradas complexas, mesmo na ausência da gerência.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), por proporcionar as condições necessárias para realização desta dissertação.

Ao professor orientador, Eduardo de Magalhães Braga, pela confiança depositada e pela orientação valiosa, que se fez presente nos momentos decisivos deste trabalho.

Aos professores e colegas da Universidade Federal do Pará: Victor, Paulo e Everton Mendonça, que me ajudaram na consolidação deste trabalho.

ÁLAN SOUZA DA SILVA

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim”. (Chico Xavier)

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGE/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M.Eng.)

**OTIMIZAÇÃO DA JUNTA SOLDADA EM DUTOS DE AÇO CARBONO
SUBMETIDA A CORROSÃO SOB TENSÃO**

Álan Souza da Silva

Dezembro/2015

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Este trabalho visa proporcionar a redução do número de trincas nas soldas de tubulações de aço carbono, onde o fluido é o licor pobre à 174°C. Através desta redução, bloqueia-se o risco de acidente por projeções de licor pobre aquecido e, por conseguinte o número de intervenções (reparos) nas linhas do processo produtivo da Hydro Alunorte. Para alcançar o objetivo deste trabalho, foram preparadas novas tubulações em aço carbono, onde a união destas se fez com metal de adição de inox. Estas soldas proporcionaram uma maior resistência à corrosão sob tensão, já que foram alteradas as propriedades na região soldada. Através deste estudo observou-se que não houve mais ocorrências de trincas nestas uniões de tubulações. Com isso, surgiu a necessidade de alterar e padronizar procedimentos de soldagem na Hydro Alunorte quando suscetível a corrosão sob tensão.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M.Eng.)

**OPTIMIZATION OF THE BOARD WELDED CARBON STEEL PIPES
POSTED CORROSION UNDER STRESS**

Álan Souza da Silva

December/2015

Advisor: Eduardo de Magalhães Braga

Research Area: Process Engineering

This work aims to provide a reduction in the number of cracks in the welding of carbon steel pipes where the fluid is poor liquor to 174 ° C. Through this reduction, blocks the risk of accident by heated poor liquor projections and therefore the number of interventions (repairs) on the lines of the production of Hydro Alunorte process. To achieve the objective of this study were prepared new pipes in carbon steel, where the union of these are made of stainless metal addition. These welds provided a greater resistance to stress corrosion cracking, because the properties have been changed in the welded region. Through this study it was observed that there were no further occurrences of cracks in those pipes unions. Thus, it became necessary to amend and standardize welding procedures at Hydro Alunorte when susceptible to stress corrosion cracking.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 - OBJETIVOS.....	4
1.1.1 - Objetivo Geral.....	4
1.1.2 - Objetivos Específicos.....	4
 CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 - PROCESSO DE SOLDAGEM.....	5
2.1.1 - Definição de Soldagem.....	5
2.1.2 - Fundamentos da Soldagem.....	6
2.1.3 - Parâmetros de Soldagem.....	8
2.1.3.1 - Tensão de (U).....	8
2.1.3.2 - Corrente de Soldagem (I).....	9
2.1.3.3 - Oscilação da Fonte de Calor.....	9
2.2 - SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO.....	10
2.2.1 - Importância.....	10
2.2.2 - Etapas.....	10
2.2.3 - Tipos e Causas Prováveis de Falhas por Desgaste.....	12
2.3 - SOLDAGEM TIG (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW)	14
2.4 - SOLDAGEM ELETRODO REVESTIDO (Shielded Metal Arc Welding – SMAW).....	15
2.5 - SOLDAGEM DE REVESTIMENTO.....	15
2.5.1 - Importância.....	15
2.5.2 - Relevância dos Revestimentos.....	15
2.5.3 - Fundamentos dos processos de revestimentos.....	17
2.5.4 - Revestimento com Metais Dissimilares.....	18
2.6 - AÇO CARBONO.....	18
2.7 - AÇO INOXIDÁVEL.....	19
2.7.1 - Influência dos Elementos de Liga no Aço Inoxidável.....	19
2.7.2 - Soldabilidade de Aços Inoxidáveis.....	20
2.7.3 - Soldabilidade.....	20
2.7.4 - Soldagem de Aços Inoxidáveis.....	21

2.8 - DIAGRAMA DE SCHAEFFLER.....	27
2.9 - ESCOLHA DA COMPOSIÇÃO ÓTIMA PARA A ZONA FUNDIDA.....	29
2.10 - CORROSÃO SOB TENSÃO (CST).....	31
2.11 - LICOR CÁUSTICO.....	37
2.12 - METALOGRAFIA.....	37
2.13 - ENSAIOS DE MICRODUREZA.....	38
 CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1 - FABRICAÇÃO DAS PEÇAS.....	40
3.1.1 - Metal de adição.....	43
3.2 - EQUIPAMENTOS DE CORTE, USINAGEM E ENSAIOS MECÂNICOS.....	44
3.2.1 - Serra de Fita.....	44
3.2.2 - Equipamento de Análise da Composição Química.....	45
3.2.3 - Equipamento de Microdureza.....	45
3.2.4 - Equipamentos para o Ensaio Metalográfico.....	45
3.2.5 - Lixadeira Politriz Metalográfica.....	45
3.2.6 - Microscópio Ótico.....	46
3.3 - REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	46
3.3.1 - Análise da Composição Química.....	48
3.3.2 - Ensaio de Microdureza.....	48
3.3.2.1 - Ensaios Metalográficos.....	49
3.3.2.2 - Macrografia.....	49
 CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1 - AVALIAÇÃO DO METAL DE ADIÇÃO.....	51
4.2 - DIAGRAMA DE SCHAEFFLER E DELONG.....	51
4.3 - PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM.....	55
4.4 - AVALIAÇÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS.....	55
4.4.1 - Macrografia.....	55
4.4.2 - Análise Química.....	57
4.4.3 - Microestrutura Na Peça No Aço Carbono.....	59

4.4.4 - Microestrutura Solda Eletrodo Aço Inox.....	60
4.5 - MICRODUREZA.....	61
4.6 - AVALIAÇÃO DE CUSTOS.....	64
 CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	 67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
ANEXO.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Tela no PSYS. Fonte: Hydro (2015).....	3
Figura 2.1	Representação da transferência por curto-circuito. Fonte: MIRANDA (2002).....	6
Figura 2.2	Transferência globular. Fonte: MIRANDA (2002).....	7
Figura 2.3	Transferência globular na posição vertical. Fonte: MIRANDA (2002).....	7
Figura 2.4	Tipo de transferência goticular. Fonte: MIRANDA (2002).....	8
Figura 2.5	Relação vetorial entre as velocidades de deslocamento longitudinal (V_{sold}) e de oscilação (V_{osc}), resultando na velocidade transversal (V_{tr}) com que a tocha se desloca de um lado para o outro na junta.....	9
Figura 2.6	Diagrama de Schaeffler empregado para fazer um prognóstico da microestrutura da solda. Fonte: MONDENESI (2008).....	27
Figura 2.7	Regiões problemáticas típicas na soldagem de aços inoxidáveis: (1) Formação de trincas de solidificação ou por perda de ductilidade acima de 1250°C; (2) fragilização por formação de fases intermetálicas após aquecimento entre cerca de 450 e 900°C; (3) fragilização por crescimento de grão; e (4) fragilização e fissuração por formação de martensita. Fonte: MONDENESI (2008).....	29
Figura 2.8	Condições mínimas para a ocorrência de CST. Fonte: FERNANDES (2010) - Com adaptação.....	31
Figura 2.9	Trincas em tubulação de aço carbono, linhas de licor pobre da área 04A da Hydro-Alunorte.....	32
Figura 2.10	Diagrama de Pourbaix (com adaptação). Fonte: NUNES (2007).....	33
Figura 2.11	Diagrama de concentração de álcalis e temperatura. Fonte: NUNES (2007).....	34
Figura 2.12	Aplicação do aço carbono em função de concentração de álcalis e temperatura. Fonte: NUNES (2007).....	35

Figura 2.13	Trincamento por corrosão sob tensão: (a) trincas intergranulares, (b) trincas transgranulares, (c) trincas mistas, transgranulares e intergranulares. Fonte: GEMELLI (2001).....	36
Figura 3.1	Conjunto oxi-corte motorizado.....	40
Figura 3.2	Ilustração da Junta de topo com chanfro em “V” usada para a fabricação das peças.....	41
Figura 3.3	Preparação do chanfro em “V”.....	41
Figura 3.4	TE com solda de raiz.....	42
Figura 3.5	Limpeza da solda de raiz e preparação da superfície para receber a contra solda.....	42
Figura 3.6	Peça aguardando instalação.....	43
Figura 3.7	Informações sobre o Eletrodo utilizado na Soldagem. Fonte: ESAB (2011).....	44
Figura 3.8	Disposição da retirada dos corpos de prova para os ensaios mecânicos e metalografia.....	47
Figura 3.9	Representação esquemática da distribuição dos pontos onde foram medidos a dureza.....	48
Figura 4.1	Diagrama de Shaeffler mostrando as regiões de desenvolvimento de problemas típicos na soldagem, para a condição otimizada. Fonte: EWM (2015).....	52
Figura 4.2	Diagrama de Schaeffler com plotagem para experimento com inox 309L.....	53
Figura 4.3	Diagrama de DeLong com plotagem para experimento com inox 309L.....	54
Figura 4.4	Valores obtidos dos Diagramas de Schaffer e De Long para experimento com inox 309L.....	54
Figura 4.5	Secção transversal do Corpo-de-prova Soldado com inox.....	56
Figura 4.6	Secção transversal do Corpo-de-prova Soldado com inox.....	56
Figura 4.7	Microestrutura do Metal de Base (Aumento de 100X).....	59
Figura 4.8	Microestrutura da Zona Termicamente Afetada (Aumento de 100X).....	59
Figura 4.9	Microestrutura da Zona Fundida (Aumento de 100X).....	59
Figura 4.10	Microestrutura do Metal de Base (Aumento de 100X).....	60

Figura 4.11	Microestrutura da Zona Termicamente Afetada (Aumento de 100X).....	60
Figura 4.12	Microestrutura da Zona Fundida (Aumento de 100X).....	60
Figura 4.13	Aspecto da amostra e esquema para medir a microdureza.....	62
Figura 4.14	Valores médios obtidos do corpo-de-prova sem adição de Níquel em Vickers.....	63
Figura 4.15	Valores médios obtidos do corpo-de-prova com adição de Níquel em Vickers.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Comparativo entre os testes de Microdureza. Fonte: Assunção - Adaptado de GARCIA et al. (2000) e CALLISTER (2008).....	39
Tabela 4.1	Valores de Área Fundida, Área Afetada pelo Calor e Diluição...	57
Tabela 4.2	Resultado Análise Química da zona fundida.....	58
Tabela 4.3	Custo médio/ano da Hydro Alunorte em uma junta de 18” (polegadas), utilizando o antigo processo de fabricação para as peças, ou seja, sem adição de níquel na poça de fusão.....	64
Tabela 4.4	Custo médio/ano da Hydro Alunorte em uma junta de 18” (polegadas), utilizando o novo processo de fabricação para as peças, ou seja, com adição de níquel na poça de fusão.....	65

NOMENCLATURA

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
AF	FERRITA ACIRCULAR
ALUNORTE	ALUMINA DO NORTE DO BRASIL S.A.
ASTM	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As perdas de produção na Hydro Alunorte por furos em linhas de tubulações vêm aumentando no decorrer dos anos, considerando somente o ano de 2014, no período de janeiro a dezembro foram registradas perdas de 7.476 toneladas de alumina, devido aos furos constantes em tubulações dentro da refinaria.

Os maiores incidentes de furos de tubulações na Hydro Alunorte são nas áreas 04 (Digestão) e 07 (Precipitação). O estudo foi realizado na área 04, devido impacto na produção ser maior, além disso, o risco de acidente ser mais grave nesta área é maior. Já que a temperatura de trabalho é de aproximadamente 170°C.

Um dos fenômenos indesejáveis que pode ocorrer nos aços austeníticos é a corrosão intergranular, devido à precipitação de carboneto de cromo. Uma das formas de evitá-la é através da adição de elementos estabilizadores do carbono, tais como nióbio e titânio, em virtude desses elementos fixarem o carbono na forma de carbonetos de titânio ou nióbio.

Para este tipo de aço, o tratamento térmico que se faz consiste em aquecimento a temperaturas entre 1000 -1120°C, seguido de resfriamento tão rápido quanto possível até a temperatura ambiente, de forma a garantir a presença da fase austenítica e conferir ao aço a melhor tenacidade e ductilidade. Pequenas seções podem ser resfriadas ao ar, ao passo que seções maiores devem ser resfriadas em água.

Por outro lado, os aços austeníticos são em geral os mais fáceis de serem soldados. Basicamente deve-se tomar cuidado com relação à fissuração, trincas a quente, sensibilização, e em menor escala, a precipitação da fase sigma.

A seguir, são citadas algumas regras sobre a soldagem dos aços austeníticos:

- Soldar com a menor energia possível;
- Usar o menor comprimento de arco possível;
- Em peças pequenas não se faz pré-aquecimento. Em peças de grandes espessuras pode-se fazê-lo, a temperaturas não muito altas;
- Martelamento de passes intermediários é aconselhável, a não ser em peças finas;
- Não se deve deixar a temperatura de interpasse passar de 200°C. Se for necessário, pode-se e deve-se promover um resfriamento após cada passe, com água, ar, etc.;
- Alívio de tensões deve ser feito quando a espessura for grande ou quando houver acúmulo de cordões de solda em peças complexas;
- Em perigo de sensitização usar eletrodo de baixo teor de carbono ou estabilizado;
- Usar sempre que possível, metal de adição que garanta ferrita delta no metal de solda;
- Em perigo de trinca a quente usar eletrodo com baixos teores de fósforo, enxofre e silício.

Na soldagem desse tipo de aço são utilizados os eletrodos inoxidáveis austeníticos, capazes de operarem em todas as posições de soldagem e apresentando características mecânico/metalúrgicas que os transformam em uma opção importante na união de materiais de difícil soldabilidade ou dissimilares. Sua capacidade de operar em todas as posições de soldagem está diretamente relacionada com a composição da escória que por sua vez é determinada pela composição do revestimento.

Aplicação de eletrodos de inox em tubulações de aço carbono não é muito empregada dentro das indústrias brasileiras. Poucas literaturas abordam este tipo de estudo. Neste trabalho vamos poder entender o motivo da aplicação de consumíveis (inox) em metal base (aço carbono), mesmo apresentando propriedades distintas. Além disso, mostraremos o retorno que este trabalho proporcionou a empresa.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Aumentar a vida útil das juntas soldadas dos dutos, localizados na área 04 (Digestão). Já que neste ponto, tínhamos constantes perdas de produção devido a reparos frequentes nas uniões de solda das tubulações de licor pobre.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Investigar analiticamente os metais de adição mais compatíveis e adequados para condição de processo;
- Aplicar o metal de adição, utilizando os procedimentos de soldagens padrões e normativos;
- Realizar a qualificação da junta soldada através de ensaios macrografia, composição química, metalografia e microdureza;
- Avaliar o custo de implantação e mostrar o ganho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo oferecer as bases teóricas para o entendimento do trabalho desenvolvido. O capítulo abrangerá tópicos como processo de soldagem, tipos de transferência, parâmetros de soldagem, soldagem de manutenção, soldabilidade dos aços inoxidáveis, o diagrama de Schaeffler, etc.

2.1. PROCESSO DE SOLDAGEM

2.1.1. Definição de Soldagem

Um grande número de diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas é abrangido pelo termo SOLDAGEM. Classicamente, a soldagem é considerada como um método de união, porém, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Diferentes processos relacionados com os de soldagem são utilizados para o corte ou para o recobrimento de peças. Diversos aspectos dessas operações de recobrimento e corte, são similares à soldagem e, por isso, muitos aspectos destes processos são abordados juntamente com esta (MONDENESI e MARQUES, 2006).

Algumas definições de soldagem são:

- “Processo de junção de metais por fusão”;
- “Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas”;
- “Operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição”;

- “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento, na região de contato entre os materiais sendo unidos, de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais. ”

2.1.2. Fundamentos da Soldagem

- Transferência por curto-circuito:

Na transferência por curto-circuito (*short arc, dip transfer, microwire*) a transferência ocorre quando um curto-circuito elétrico é estabelecido. Isso acontece quando o metal fundido na ponta do arame toca a poça de fusão. Essa técnica de soldagem é particularmente útil na união de materiais de pequena espessura em qualquer posição, materiais de grande espessura nas posições vertical e sobre cabeça, e no enchimento de largas aberturas. A soldagem por curto-circuito também deve ser empregada quando se tem como requisito uma distorção mínima da peça. O metal é transferido do arame à poça de fusão apenas quando há contato entre os dois, ou a cada curto-circuito. O arame entra em curto-circuito com a peça de 20 a 200 vezes por segundo (MIRANDA, 2002).

A Figura 2.1 ilustra os sinais de tensão e de corrente de soldagem com as respectivas imagens da transferência por curto-circuito. Assim as linhas pontilhadas indicam os instantes nos quais as imagens foram obtidas.

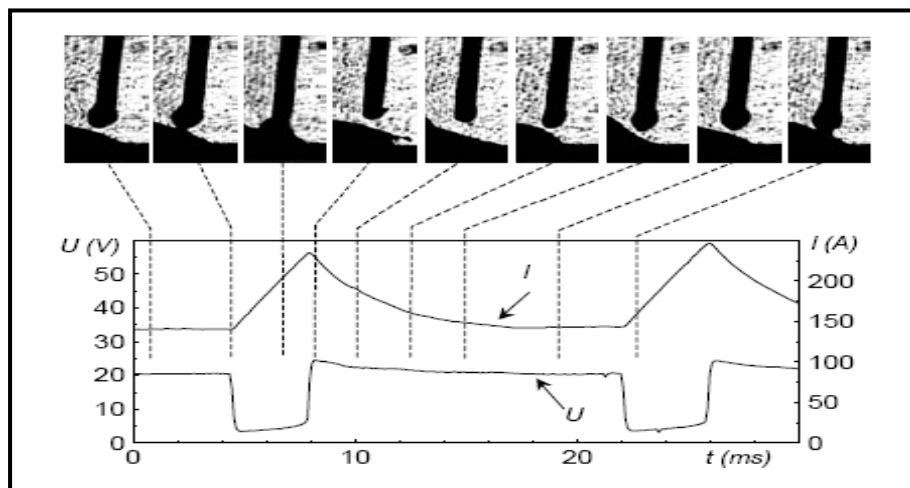


Figura 2.1 - Representação da transferência por curto-circuito Fonte: MIRANDA (2002).

- Transferência globular

A transferência globular (*globular*) ocorre quando as gotas de metal fundido são muito grandes e movem-se em direção à poça de fusão sob a influência da gravidade.

Quando a corrente e a tensão de soldagem são aumentadas para valores acima do máximo recomendado para a soldagem por curto-circuito, a transferência de metal começará a tomar um aspecto diferente. Essa técnica de soldagem é comumente conhecida como transferência globular, na qual o metal se transfere através do arco. Usualmente as gotas de metal fundido têm diâmetro maior que o do próprio arame, conforme podemos ver na Figura 2.2. Esse modo de transferência pode ser instável, com respingos e curtos-circuitos ocasionais.

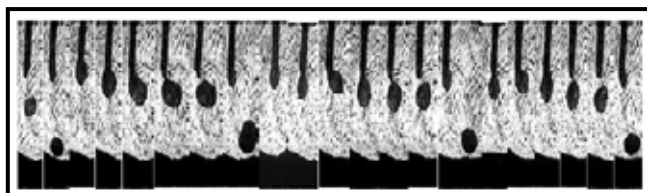


Figura 2.2 - Transferência globular Fonte: MIRANDA (2002)

A transferência globular se restringe, normalmente, à posição plana pelo fato da força gravitacional ser dominante, de maneira que para soldagem fora de posição a gota pode não atingir a poça de fusão adequadamente, como visualizado na Figura 2.3.

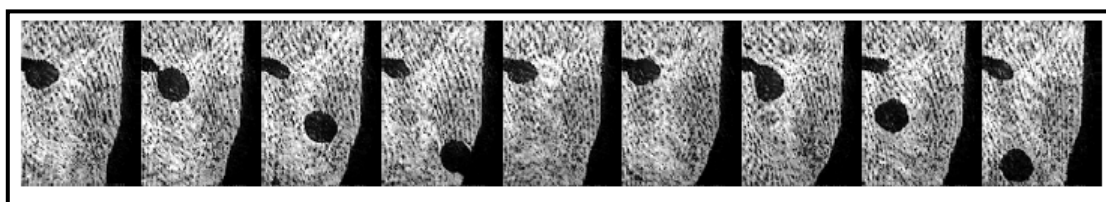


Figura 2.3 - Transferência globular na posição vertical Fonte: MIRANDA (2002)

- Transferência goticular (aerossol)

Na transferência goticular, pequenas gotas de metal fundido são desprendidas da ponta do arame e projetadas por forças eletromagnéticas em direção à poça de fusão. As gotas que saem do arame são muito pequenas, proporcionando boa estabilidade ao arco. Curtos-circuitos são raros. Poucos respingos são associados com essa técnica de soldagem.

A soldagem goticular pode produzir altas taxas de deposição do metal de solda. Portanto essa técnica de soldagem é geralmente empregada para unir aços de espessura 2,4 mm e maiores, exceto na soldagem de alumínio ou cobre, o processo de arco goticular fica geralmente restrito apenas à soldagem na posição plana por causa da grande poça de fusão. No entanto, aços carbono podem ser soldados fora de posição usando essa técnica com uma poça de fusão. A transferência goticular pode ser classificada em três tipos básicos: projetada, com alongamento e rotacional, conforme pode ser visto na Figura 2.4 a) goticular projetada; b) goticular com alongamento e c) goticular rotacional (MIRANDA, 2002).

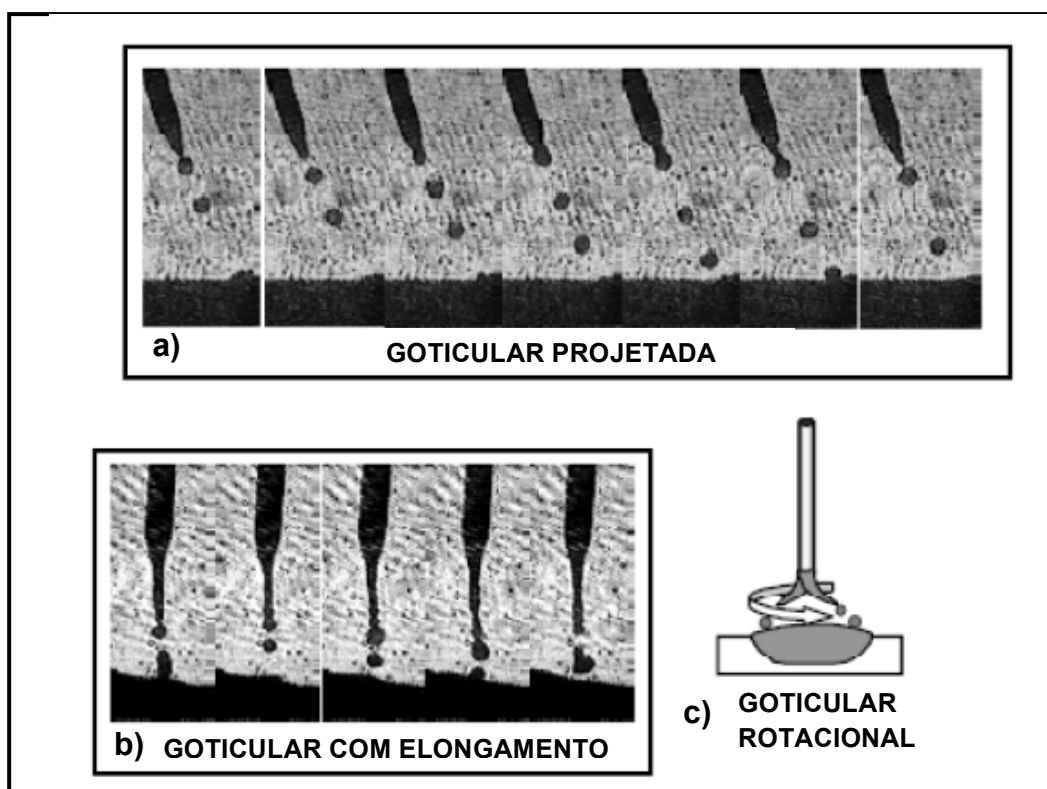


Figura 2.4 - Tipo de transferência goticular Fonte: MIRANDA (2002).

2.1.3. Parâmetros de Soldagem

2.1.3.1. Tensão de Soldagem (U) A tensão de soldagem influencia no insumo de calor e apresenta uma relação direta com o comprimento e a largura do arco.

De uma maneira geral, tensões baixas favorecem a transferência por curto-circuito.

Valores elevados de tensão podem proporcionar o aparecimento de salpicos, mordedura e porosidade e valores baixos de tensão podem propiciar o aparecimento de sobreposição de metal na margem do cordão de solda e porosidade (SÁBIO, 2007).

2.1.3.2. Corrente de Soldagem (I)

Segundo SÁBIO (2007) a corrente de soldagem alta poderá influenciar diretamente na geometria do cordão de solda, no volume da poça fundida, no incremento da taxa de fusão, na largura da ZTA e no efeito sobre o aporte térmico alterando a microestrutura do metal depositado. A corrente de soldagem pode alterar o modo de transferência metálica.

2.1.3.3. Oscilação da Fonte de Calor

Sabe-se que o tecimento ou oscilação da fonte de calor tem ação preponderante sobre as características geométricas do cordão de solda. O tecimento é caracterizado por parâmetros de regulação, sendo os principais a frequência e amplitude de oscilação e os tempos de parada central e lateral.

FRATARI (2008) concluiu em seu trabalho que a velocidade de deslocamento transversal da fonte de calor (V_{tr}), mostrada na Figura 2.5, é uma variável de grande importância, pois determina a real distribuição do calor imposto. A Figura 2.5 ilustra a relação da velocidade transversal com as velocidades de soldagem (V_{sold}) e de oscilação (V_{osc}). Segundo ainda Fratari (2008) as equações 2.1 e 2.2 quantificam a relação entre as três velocidades.

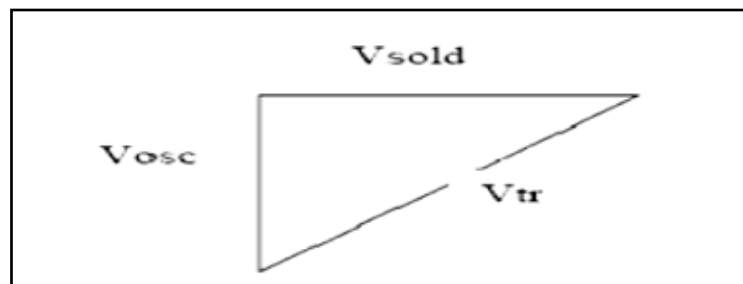


Figura 2.5 - Relação vetorial entre as velocidades de deslocamento longitudinal (V_{sold}) e de oscilação (V_{osc}), resultando na velocidade transversal (V_{tr}) com que a tocha se desloca de um lado para o outro na junta.

$$V_{osc} = \frac{2fA}{1 - 2ft_{pl}} \quad (2.1)$$

$$V_{tr}^2 = \left(\frac{2fA}{1-2ft_{pl}} \right)^2 + V_{Sold}^2 \quad (2.2)$$

Sendo:

V_{osc} = Velocidade de Oscilação da fonte de calor (tocha de soldagem);

V_{tr} = Velocidade de deslocamento transversal da fonte de calor;

V_{sold} = Velocidade de Soldagem;

f = Frequência de Tecimento da fonte de calor;

A = Amplitude de Tecimento da fonte de calor;

t_{pl} = Tempo de parada lateral da fonte de calor.

2.2. SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO

2.2.1. Importância A soldagem de manutenção é um meio ainda muito utilizado para prolongar a vida útil das peças de máquinas e equipamentos. Promove economia para a indústria, pois reduz as paradas de máquinas e diminui a necessidade de se manter grandes estoques de reposição e tem como objetivo principal agir com rapidez e eficiência para que equipamentos e máquinas danificadas voltem a funcionar para garantir a produção.

2.2.2. Etapas

As etapas percorridas na soldagem de manutenção são:

- Análise da falha

a) Analisar o local da falha;

b) Determinar a causa da falha:

- Fratura;

- Desgaste;

- Corrosão.

c) Determinação do funcionamento:

- Solicitações (rpm);
- Meios envolvidos;
- Temperatura de trabalho.

d) Reconhecimento dos materiais envolvidos:

- Análise química;
- Dureza.

e) Determinação do estado do material:

- Encruado;
- Recozido;
- Temperado e revenido;
- Cementado.

Planejamento da execução:

Após a escolha do método/processo de soldagem e do metal de adição, é necessário verificar se estão envolvidos na recuperação os seguintes fatores:

- Pré-usinagem;
- Deformação;
- Sequência de soldagem;
- Pré e pós-aquecimento;
- Tratamento térmico pós-soldagem;
- Desempeno;
- Pós-usinagem.
- Procedimentos

De um modo geral os procedimentos para a execução de uma soldagem de manutenção devem conter, no mínimo, os seguintes passos:

Desgaste/Corrosão

- Localizar a região desgastada ou corroída, definindo os limites da região a ser recuperada;

- Identificar adequadamente a superfície a ser revestida através da superfície desgastada ou corroída por meio de esmerilhamento ou usinagem;
- Limpar a região a ser soldada para retirar o óleo, graxa ou impurezas que possam de algum modo, prejudicar a soldagem da peça/componente a ser recuperada;
- Executar ensaio com líquido penetrante para verificar se na região desgastada não existem descontinuidades que possam comprometer a soldagem;
- Especificar o processo de soldagem e o metal de adição para que a peça/componente, após recuperação, seja capaz de suportar as solicitações máximas exigidas durante o trabalho. No caso de corrosão, o metal de adição deverá ser adequado para resistir ao meio agressivo;
- Especificar os parâmetros de soldagem, incluindo, quando necessário, a temperatura de pré e pós-aquecimento e o tratamento de alívio de tensões pós-soldagem;
- Especificar uma adequada sequência de soldagem de modo que haja um mínimo de tensões internas e deformações da peça/componente que está sendo recuperada;
- Especificar o tipo de ensaio a ser realizado para verificar a qualidade da solda aplicada.

2.2.3. Tipos e Causas Prováveis de Falhas por Desgaste

Há uma grande variedade de fatores que podem provocar o desgaste de peças/componentes de uma máquina ou equipamento. Nesse caso, para recuperação adequada com a finalidade de assegurar eficiência e segurança, os metais de solda, a serem depositados, devem ser selecionados cuidadosamente. Para melhor compreensão dos tipos de desgastes, podemos dividi-los em classes distintas com características bem definidas. Vejamos:

a) Desgastes mecânicos

- Abrasão

A abrasão é um desgaste que ocorre entre superfícies que deslizam ou giram em contato entre si em movimento relativo. A abrasão provoca o desprendimento de partículas das superfícies que adquirem irregularidades microscópicas, mesmo que aparentemente polidas. Por exemplo: sempre há abrasão quando um eixo gira em contato com um mancal.

As irregularidades microscópicas das superfícies comportam-se como picos e vales que tendem a se encaixar. Quando as superfícies são solicitadas a entrar em movimento relativo entre si, a força de atrito gera calor e este gera microfusões entre os picos que estão em contato. As áreas microfundidas movimentam-se e as superfícies se desgastam.

A recuperação de superfícies desgastadas por abrasão é realizada pela deposição, por solda, de um material mais duro e mais resistente ao desgaste. Aconselha-se não aplicar mais de duas ou três camadas de solda, para evitar a fissuração e desagregação do próprio metal de solda que apresenta baixa ductilidade.

Se a soldagem exigir camadas mais espessas, o revestimento deverá ser executado com um metal tenaz e pouco duro que se comportará como amortecedor.

- Impacto

Materiais sujeitos a impacto sofrem deformações localizadas e mesmo fraturas. Por impacto e em condições de alta pressão, partículas metálicas dos materiais são arrancadas e, como consequência, o desgaste aparece.

Se um dado componente ou peça - a ser recuperado por solda – trabalha somente sob condições de impacto simples, o material a ser depositado deve ser tenaz para poder absorver a deformação sem se romper.

Normalmente, áreas de peças ou componentes que recebem impactos também sofrem abrasões. É o que ocorre, por exemplo, em moinhos e britadores que necessitam de superfícies duras e resistentes ao desgaste.

b) Erosão

É a destruição de materiais por fatores mecânicos que podem atuar por meio de partículas sólidas que acompanham o fluxo de gases, vapores ou líquidos, ou podem atuar por meio de partículas líquidas que acompanham o fluxo de gases ou de vapores.

c) Cavitação

O fenômeno da cavitação é causado por fluidos acelerados que se movimentam em contato com superfícies sujeitas a rotações, tais como hélices, rotores, turbinas etc. Os fluidos acelerados formam depressões que, ao se desfazerem, provocam golpes, como se fossem arietes, nas superfícies das peças sujeitas ao movimento rotacional. Esses golpes produzem cavidades superficiais que vão desgastando as peças.

d) Corrosão

O desgaste de materiais metálicos também pode ser provocado pela corrosão que é favorecida por vários fatores: umidade, acidez, alcalinidade, temperatura, afinidade química entre metais etc. Normalmente a maioria dos metais e ligas metálicas, em contato com o oxigênio do ar, adquire uma camada protetora de óxido que a protege. Se essa camada de óxido perder a impermeabilidade, a oxidação prossegue caracterizando a corrosão. A corrosão é sanada por meio de revestimentos com materiais de solda adequados, de forma tal que venham a resistir ao meio agressivo com os quais estarão em contato.

2.3. SOLDAGEM TIG (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW)

A solda destas tubulações será realizada através de dois processos de soldagem, o primeiro deles foi o processo TIG e o outro foi através do eletrodo revestido.

Segundo MARQUES et al. (2009), a soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (Tungsten Inert Gás – TIG) é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a unir. A proteção da poça de fusão e do arco contra a contaminação pela atmosfera é feita por uma nuvem de gás inerte ou mistura de gases inertes. Este processo pode ou não ser realizado com metal de adição e, quando usado, é feito diretamente na poça de fusão.

2.4. SOLDAGEM ELETRODO REVESTIDO (Shielded Metal Arc Welding – SMAW)

A soldagem a arco com eletrodo revestido é um processo que produz a coalescência entre metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e a peça que está sendo soldada (MARQUES et al., 2009).

Os eletrodos de aço inoxidável E 309L-17 são eletrodos para operar em CC+ (corrente contínua com polaridade inversa) e CA (corrente alternada), com revestimento rutilico (potássio), apresentam melhores aspectos superficiais e características operacionais que os do tipo 16, utilizável em todas as posições (MARQUES et al., 2009).

2.5. SOLDAGEM DE REVESTIMENTO

2.5.1. Importância A soldagem de revestimento é muito empregada para aumentar ou melhorar a vida de componentes de mecânicos e reduzir o custo deles, pois se trata de um processo repetitivo de fabricação e pode ser utilizado para compor uma ou várias camadas de uma determinada seção, obtendo-se dessa maneira o revestimento desejado (CORRÊA, 2000).

Segundo a ASTM (1983b), a deposição pode variar de 5 a 50% do total da espessura do material, mas geralmente as aplicações são da ordem de 10 a 20%, com a espessura mínima de 1,5mm. Durante a deposição pelo processo de soldagem, devido características requeridas no revestimento, deseja-se obter uma penetração relativamente pequena. Já o reforço e a largura do cordão devem ser os maiores possíveis, aumentando-se desta maneira a espessura do revestimento e, conseqüentemente, diminuindo o número de cordões a serem aplicados.

2.5.2. Relevância dos Revestimentos

Equipamentos que operam em ambientes agressivos, como por exemplo, no refino do petróleo, têm o processo de deterioração dos seus materiais acelerado pela coexistência dos fenômenos de corrosão e erosão em elevadas temperaturas. A corrosividade do petróleo está relacionada com a presença de compostos de enxofre e ácidos naftênicos.

A erosão decorre da ação de partículas sólidas em suspensão sendo deslocadas em velocidade, como por exemplo, em poço termométrico, válvulas de controle de vazão em conversores de craqueamento catalítico e carcaça e internos de bombas.

Portanto os materiais destes componentes irão se degradar, com taxas diferenciadas, dependendo da severidade de operação a que estarão sujeitos. Outros exemplos de degradação de materiais podem ser encontrados nos equipamentos sujeitos a desgaste abrasivo (martelos de moinho, ferramentas de escavação, roscas de extrusão, lâminas de corte e moinhos de bola) e atrito metal-metal com pouca ou nenhuma lubrificação (válvulas de controle, peças de chassi de tratores e escavadeiras e rolamentos de alta performance) (BOND, 2008).

Para aumentar a campanha operacional destes equipamentos pode-se aplicar um revestimento o qual irá prolongar sua vida útil. Sendo assim haverá uma diminuição dos custos envolvidos na substituição de peças ou equipamentos, bem como da manutenção dos mesmos.

Várias são as técnicas utilizadas para a proteção superficial, como a utilização de pintura, imersão a quente (galvanização), aspersão térmica (metalização), cladização (chapas revestidas), eletrodeposição (Cu, Ni), por difusão (cementação e deposição em fase gasosa), redução química (niquelação) e soldagem (overlay), entre outros.

O termo surfacing, aplicado para a soldagem, refere-se à deposição de um material de adição num metal de base (substrato) com o objetivo de alcançar propriedades desejadas que o substrato não possua. Os processos utilizados são classificados como: endurecimento superficial (hardfacing), recuperação (buildup), cladização (cladding), e amanteigamento (buttering).

O endurecimento superficial (hardfacing) é aplicado para reduzir desgaste, abrasão, impacto, erosão, galling ou cavitação. Para tanto são utilizados os processos de soldagem oxigás, a arco e laser, os quais são aplicados, preferencialmente, para obter espessuras maiores quando comparados aos processos de aspersão térmica, nos quais não há fusão e sim um ancoramento mecânico entre material de base e de adição (BOND, 2008).

Segundo BOND (2008), os processos de soldagem mais utilizados são: soldagem oxiacetilênica, TIG (Tungsten Inert Gas), MIG/MAG (Metal Inert Gas/ Metal Active Gas), arco submerso e plasma por arco transferido (PTA).

2.5.3. Fundamentos dos processos de revestimentos

A técnica de soldagem de revestimento pode ser classificada de acordo com as propriedades conferidas à camada depositada. As camadas denominadas revestimento, revestimento duro e amanteigamento servem para conseguir resistência à corrosão (para desgaste químico), resistência ao desgaste (para desgaste físico), controle dimensional (para recuperação de componentes desgastados) e necessidades metalúrgicas respectivamente.

Existem várias categorias de revestimento que são utilizadas de acordo com as propriedades que se desejem obter, conforme descrito a seguir:

a) Revestimentos de Aços Inoxidáveis (“Cladding”)

São utilizados, geralmente, para depositar uma capa de metal de aporte sobre um aço ao carbono de baixa liga com o propósito de prover uma proteção contra a corrosão ambiental, quando em geral, a resistência de revestimento não é incluída no projeto do componente.

Esse tipo de revestimento pode ser aplicado para resistir à corrosão localizada ("pitting"), gretas de corrosão, corrosão intergranular e corrosão de baixas tensões. A resistência à corrosão do revestimento, em muitos casos, é o fator limitante na vida do componente, sendo, portanto, a primeira consideração a ser levada em conta para selecionar a liga, o processo de soldagem e o procedimento a utilizar.

b) Revestimentos de Reconstrução (“Build up”)

Refere-se à adição de metal por soldagem, na superfície do metal base, com o objetivo de restaurar as dimensões originais no componente. A resistência da solda é um importante pré-requisito que deve ser considerado no projeto.

c) Amanteigamento (“Buttering”)

Aplicação de um ou mais passes de solda na face da junta. A diferença do caso anterior está no fato de ser usado por razões metalúrgicas e não por controle dimensional. Um exemplo clássico é a deposição de ligas de alto níquel sobre uma base de aço de baixa liga. A parte amanteigada pode ser usada na condição como soldada ou sofrer tratamento térmico posterior para a obtenção de propriedades especiais.

d) Revestimentos duros (“Hardfacing”)

Entende-se por revestimento duro, uma liga homogeneamente depositada por soldagem, na superfície de um material macio, geralmente um aço de baixo ou médio carbono, com o propósito de aumentar a sua dureza e resistência ao desgaste, sem provocar perda significativa de ductilidade e tenacidade do substrato. Os revestimentos duros são empregados com o fim de reduzir o desgaste por abrasão, erosão, impacto ou cavitação.

2.5.4. Revestimento com Metais Dissimilares

Na soldagem de revestimento com metais dissimilares, a diluição é um fator extremamente importante, pois uma diluição excessiva pode causar mudanças nas propriedades do aço nobre (aço inoxidável), através da influência do metal de base menos nobre (aço carbono). Com relação à resistência à corrosão, há normalmente requisitos particulares para cada tipo de junta, porque as ligas de aço de baixo carbono não são resistentes à corrosão.

2.6. AÇO CARBONO

Os aços são ligas ferro-carbono que podem conter concentrações apreciáveis de outros elementos de liga; existem milhares de ligas que possuem composições e/ou tratamentos térmicos diferentes. As propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono, que normalmente inferior a 1,0%p. Alguns dos aços mais comuns são classificados de acordo com a concentração de carbono – quais sejam: aços com baixo, médio e alto teor de carbono. Também existem subclasses dentro de cada grupo, de acordo com as concentrações de outros elementos de liga. Os aços-carbono contêm apenas concentrações residuais de impurezas além do carbono e de um pouco de manganês. Para os aços-liga, mais elementos de liga são adicionados intencionalmente em concentrações específicas (CALLISTER, 2008).

2.7. AÇO INOXIDÁVEL

Segundo FERNANDES (2010), Aço inoxidável é o termo empregado para identificar uma família de aços contendo no mínimo 11% de cromo, elemento químico que garante ao material elevada resistência à corrosão. Distribuído de forma homogênea por todo o aço inoxidável, o cromo, ao entrar em contato com o oxigênio do ar, forma uma camada fina, contínua e resistente de óxido sobre a superfície do aço, protegendo-o contra ataques corrosivos do meio ambiente.

2.7.1. Influência dos Elementos de Liga no Aço Inoxidável

1- Cr (cromo)

- A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis depende do teor de cromo contido.

- Quanto maior o cromo contido maior a resistência à corrosão.

2- Ni (níquel)

- Muda a estrutura cristalográfica da liga.

- Torna o aço mais dúctil.

- Torna o aço não magnético.

3- C (carbono)

- Com o cromo somente, torna o aço endurecível por têmpera através de tratamento térmico.

4- Ti (titânio) e Nb (nióbio)

- Evita a combinação do carbono com o cromo evitando perda de resistência à corrosão e melhora a soldabilidade.

2.7.2. Soldabilidade de Aços Inoxidáveis

Aço inoxidável é o termo empregado para identificar uma família de aços contendo no mínimo 12% de cromo, que lhes garante elevada resistência à oxidação. O cromo disperso em todo material de forma homogênea, em contato com o oxigênio do ar atmosférico, forma uma fina camada de óxido na superfície do aço, contínua e muito resistente, protegendo-o contra-ataques corrosivos do meio ambiente (BRAGA, 2002).

Este filme protege toda a superfície do aço inoxidável e, de maneira geral, esta resistência aumenta à medida que mais cromo é adicionado à mistura.

Além do cromo outros elementos são adicionados ao aço inoxidável elevando a sua resistência à corrosão, tais como o níquel, o molibdênio, o vanádio, o tungstênio entre outros. Estes elementos tornam o aço inoxidável adequado a múltiplas aplicações, cada uma delas contendo porcentagens específicas destas substâncias químicas.

Os diversos tipos de aços inoxidáveis podem ser classificados em três grandes grupos, facilitando a seleção e a adequação do material ao tipo de aplicação exigida. De acordo com sua composição química e as características metalúrgicas de produção, eles se dividem principalmente em martensíticos, ferríticos, austeníticos e duplex.

2.7.3. Soldabilidade

A American Welding Society (AWS) define soldabilidade como “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço” (MONDENESI, 2008).

A maioria das ligas metálicas são soldáveis, mas, certamente, algumas são muito mais difíceis de serem soldadas por um dado processo que outras. Por outro lado, o desempenho esperado para uma junta soldada depende fundamentalmente da aplicação a que está se destina. Assim, para determinar a soldabilidade de um material, é fundamental considerar o processo e procedimento de soldagem e a sua aplicação. Assim, é importante conhecer bem o material sendo soldado, o projeto da solda e da estrutura e os requerimentos de serviço (cargas, ambiente, etc.).

Na maioria dos casos, a produção de uma solda envolve o uso de calor e/ou deformação plástica, resultando em uma estrutura metalúrgica diferente da do metal

base. Soldas podem, também, apresentar descontinuidades como vazios, trincas, material incluso, etc.

2.7.4. Soldagem de Aços Inoxidáveis

A soldagem é o principal processo industrial de união de metais. Processos de soldagem e processos afins são também largamente utilizados na recuperação de peças desgastadas e para a aplicação de revestimentos de características especiais, frequentemente o aço inoxidável, sobre superfícies metálicas. Esta grande utilização deve-se a diversos fatores e, em particular, à sua relativa simplicidade operacional. Apesar de sua utilização ampla, processos de soldagem e processos afins afetam mecânica, térmica e metalurgicamente, em geral de forma intensa, a solda e regiões vizinhas a esta. Como resultado, podem ocorrer nestes locais alterações de microestrutura e de composição química, o aparecimento de um elevado nível de tensões residuais, e degradação de propriedades (mecânicas, químicas, etc.) e a formação de descontinuidades (MONDENESI, 2001).

Para MONDENESI (2008) os aços inoxidáveis são ligas ferrosas de excelente resistência à corrosão em diversos ambientes. São basicamente ligas Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni, podendo conter, ainda, elementos como C, N, Mo, Mn, Nb, Ti, etc, seja como elementos de liga seja como residuais. A forma mais usual de classificar estes materiais baseia-se na sua microestrutura usual, resultante do balanço de elementos de liga e dos tratamentos térmicos e mecânicos aplicados, isto é:

a) Aços Inoxidáveis Ferríticos:

São ligas Fe-Cr, com teor de cromo, em geral, entre 11 e 30% e um teor de carbono relativamente baixo, em geral inferior a 0,12%. O tipo mais comumente usado deste aço é o AISI 430. Estes aços não são temperáveis e sua granulação só pode ser refinada por uma combinação adequada de trabalho mecânico e recozimento. Se expostos por tempos prolongados a temperaturas em torno de 500°C, estes aços podem ser fragilizados pela precipitação de intermetálicos. No estado recozido, sua ductilidade e tenacidade à temperatura ambiente são geralmente satisfatórias. Apresentam boa resistência à corrosão e à oxidação, inclusive em altas temperaturas. São usados em aplicações envolvendo o ácido nítrico, na fabricação de eletrodomésticos, cubas, utensílios para cozinha e laboratórios, em aplicações a alta temperatura, etc.

Apresentam uma estrutura predominantemente ferrítica em qualquer temperatura até a sua fusão.

Estes aços apresentam coeficiente de expansão térmica similar aos aços doces, tendo, portanto, menor tendência à distorção. Apresentam, contudo, sérios problemas de perda de ductilidade e tenacidade e de resistência à corrosão da região da solda devido à formação de uma estrutura de granulação grosseira, à precipitação de carbonetos e nitretos e à formação de uma rede de martensita ao longo dos contornos dos grãos de ferrita. Estes problemas limitam para a maioria dos aços ferríticos, a utilização da soldagem para aplicações de pequena responsabilidade. Nestes casos, para algumas aplicações, pode-se utilizar metal de adição austenítico para restringir estes problemas à ZTA da solda. Novos tipos de aços inoxidáveis ferríticos com extra baixo teor de elementos intersticiais ($C+N < 0,03\%$) e adições de Nb ou Ti (elementos que se ligam fortemente aos elementos intersticiais reduzindo a sua influência negativa durante a soldagem) têm sido desenvolvidos. Estes aços apresentam um comportamento melhor para a soldagem e têm sido utilizados em aplicações que envolvem soldagem como em tubulações, trocadores de calor e sistemas de escapamento de automóveis.

Os aços ferríticos também são magnéticos. Apesar de conter menor quantidade de carbono que os martensíticos, tornam-se parcialmente os austeníticos a altas temperaturas e, conseqüentemente, precipitam martensita durante o resfriamento.

Pode-se dizer que são parcialmente endurecíveis por tratamento térmico. Contém geralmente um teor de cromo (12% a 30%) superior ao dos martensíticos. Este aumento na quantidade de cromo melhora a resistência à corrosão em diversos meios, mas sacrifica em parte outras propriedades, como a resistência ao impacto.

Quando comparados com os aços austeníticos, os ferríticos possuem as seguintes características:

- Eles são mais econômicos;
- São soldáveis, com alguns cuidados especiais;
- São facilmente conformados (dobrados, cortados, etc.);
- São adequados para temperaturas moderadamente elevadas;
- Sua resistência cresce ligeiramente por trabalho a frio (cerca de 50%);
- Têm elevada resistência à corrosão sob tensão;
- São magnéticos.

b) Aços Inoxidáveis Martensíticos:

São, geralmente, ligas Fe-Cr-C, com teores de cromo entre 11 e 18% e entre 0,1 e 0,5% (podendo, em alguns casos, chegar a 1%) de carbono e capazes de serem austenitizadas a uma temperatura suficiente elevada.

O tipo mais comumente usado deste aço é o AISI 410. Devido à sua elevada temperabilidade, estas ligas podem apresentar uma estrutura completamente martensítica mesmo após um resfriamento ao ar calmo. São, portanto, ligas endurecíveis por tratamento térmico, sendo usadas, em geral, no estado temperado e revenido.

Sua resistência à corrosão é inferior à dos outros tipos, sendo, contudo, satisfatória para meios mais fracamente corrosivos. São particularmente adequados para aplicações que requerem elevada resistência mecânica, dureza e resistência à abrasão ou erosão em ambiente seco ou úmido como, por exemplo, em componentes de turbinas a gás ou vapor, mancais e em peças de cutelaria.

Aços inoxidáveis martensíticos de baixo teor de carbono podem ser soldados sem maiores problemas. Aços com teor de carbono acima de 0,15% tendem a ser temperáveis ao ar e, assim, é necessário o uso de pré-aquecimento e, frequentemente, de pós-aquecimento para a sua soldagem. Temperatura de pré-aquecimento varia usualmente entre 230 e 290°C. O Pós-aquecimento deve ser feito imediatamente após a soldagem, entre 650 e 760°C, seguido de resfriamento lento até a temperatura ambiente. Pré-aquecimento ou pós-aquecimento deficientes levam à formação de trincas de têmpera na região solda, potencializadas pela presença de hidrogênio. Quando o pré-aquecimento for impossível, metal de adição inoxidável austenítico deve ser usado.

Nos aços inoxidáveis martensíticos, o carbono está numa concentração tal que permite a formação de martensita, durante o resfriamento, a partir da austenita em altas temperaturas.

A martensita é uma fase rica em carbono, frágil e dura. Os aços inoxidáveis martensíticos têm característica comum de serem magnéticos e endurecíveis por tratamento térmico, apresentando, quando temperados uma estrutura acircular.

Esses aços são normalmente fornecidos pela indústria siderúrgica em estado recozido, com ductibilidade razoavelmente boa, somente depois de temperados é que se tornarão muito duros e pouco dúcteis, mas resistente à corrosão.

Suas principais características são:

- Ligas de ferro e cromo (12 a 18%), com um teor de carbono tipicamente;
- Superior a 0,10%;
- Moderada resistência à corrosão;
- São endurecíveis por tratamento térmico, podendo alcançar níveis mais elevados de resistência mecânica e dureza;
- Soldabilidade pobre;
- São magnéticos.

c) Aços Inoxidáveis Austeníticos:

Esta classe inclui, principalmente, ligas Fe-Cr-Ni. Apresentam estrutura predominantemente austenítica à temperatura ambiente, não sendo endurecíveis por tratamento térmico. Formam o grupo mais usado e numeroso de aços inoxidáveis. Contêm entre 16 e 30% de Cr, entre 6 e 26% de Ni e menos de 0,3% de carbono, sendo o tipo mais comum o aço AISI 304. Apresentam, à temperatura ambiente, um baixo limite de escoamento, um limite de resistência elevado e grande ductilidade. São, entre os aços inoxidáveis, os materiais de melhor soldabilidade e resistência geral à corrosão. Encontram aplicações na indústria química, alimentícia, de refino de petróleo e em muitas outras.

Todos os aços austeníticos são relativamente simples de soldar, com exceção dos aços com adição de enxofre para usinagem fácil. Os aços austeníticos apresentam coeficiente de expansão térmica maior (cerca de 45%), maior resistência elétrica e menor condutividade térmica que os aços carbono. Nos aços com teor de carbono superior a 0,06%, carbonetos podem ser precipitados nos contornos de grão da ZTA, durante o ciclo térmico de soldagem, prejudicando a resistência à corrosão.

Devido à menor temperatura de fusão destes aços e sua menor condução de calor, a corrente de soldagem é usualmente menor que a usada em aços doces.

Um maior coeficiente de expansão térmica torna maior a tendência à distorção na soldagem destes aços e levam à necessidade da adoção de técnicas para a sua redução. Para chapas finas, dispositivos de fixação e um ponteamto cuidadoso são, em geral, uma necessidade.

Dependendo de sua composição química (maior quantidade de elementos gamagênicos), o metal de solda pode solidificar-se com uma estrutura completamente austenítica. Nestas condições, a solda é muito sensível ao aparecimento de trincas durante a solidificação. Este problema é minimizado pela seleção de metal de adição que possibilite uma estrutura austeno-ferrítica na solidificação e resulte em cerca de 4 a 10% de ferrita na solda à temperatura ambiente.

Nos casos em que a seleção de um consumível deste tipo não seja possível, isto é, havendo a necessidade de uma estrutura completamente austenítica na solda (em ambientes altamente corrosivos ou em aplicações criogênicas, por exemplo), eletrodos com baixos teores de enxofre e fósforo e uma elevada relação Mn/S devem ser usados junto com um procedimento de soldagem que minimize o nível de tensões na solda.

Dos grupos de aços inoxidáveis mais utilizados, os aços inoxidáveis austeníticos são os que apresentam maior resistência à corrosão. Estes combinam baixo limite de escoamento com alta resistência à tração e bom alongamento, oferecendo assim as melhores propriedades para trabalho a frio.

Embora não seja possível mudar suas propriedades mecânicas pelo tratamento térmico, sua resistência à tração e dureza pode ser aumentada pelo encruamento.

Suas principais características são:

- Ligas de ferro, cromo (17 a 25%) e níquel (7 a 20%);
- Podem ser endurecidos por trabalho a frio (cerca de quatro vezes);
- Podem ser facilmente soldados;
- Possuem alta ductilidade;
- Possuem elevada resistência à corrosão;
- São adequados para trabalho a elevadas temperaturas (até 925°C);
- São adequados para trabalho a baixas temperaturas (inclusive aplicações criogênicas - abaixo de 0°C);
- Não são magnéticos.

d) Aços inoxidáveis duplex:

São ligas Fe-Cr-Ni-Mo-N, podendo conter, ainda, adições de Cu e outros elementos. Apresentam uma estrutura austeno-ferrítica com aproximadamente 50% de cada fase. São caracterizados por uma elevada resistência mecânica e excelente

resistência à corrosão, particularmente em ambientes contendo cloretos, nos quais os aços austeníticos têm um pior desempenho.

Estes aços tendem a ser facilmente soldáveis desde que cuidados necessários sejam tomados.

Em particular, um resfriamento muito rápido potencializa um teor muito elevado de ferrita e a precipitação de nitretos de cromo na ZTA e ZF, o que prejudica a tenacidade e a resistência à corrosão da solda. Por outro lado, um resfriamento muito lento e a manutenção por tempos longos a temperaturas entre cerca de 1000 e 600°C pode levar a precipitação de compostos intermetálicos que também prejudicam as propriedades mecânicas e químicas da solda.

Assim, o controle da energia de soldagem e da temperatura de pré-aquecimento é muito importante para estes materiais. Para reduzir a quantidade de ferrita na ZF, o uso de uma mistura Ar-N₂ como gás de proteção é comum.

Metal de adição de aço inoxidável (principalmente austenítico) é comumente utilizado na soldagem de outros tipos de aços, na união de aços inoxidáveis com outros aços e na fabricação de revestimentos protetores contra a corrosão ou contra diversos tipos de desgaste.

Os três processos mais utilizados para a soldagem de aços inoxidáveis são SMAW, GTAW e GMAW (MIG/MAG), embora vários outros sejam também usados. O processo SMAW é utilizado em serviços em geral, particularmente no campo e em diferentes posições. O processo GTAW é amplamente utilizado na soldagem de peças de aço inoxidável de menor espessura. O processo GMAW (MIG/MAG) é utilizado para juntas mais espessas, sendo um processo de maior produtividade. Transferências spray (com misturas Ar-2%O₂ ou 5%O₂) e por curto-circuito (com misturas Ar-CO₂ e Ar-He-CO₂) podem ser usadas. Arames tubulares para a soldagem destes aços estão se tornando mais comuns nos últimos anos.

Aços inoxidáveis podem ser considerados como ligeiramente mais difíceis de soldar que aços de baixo carbono, mas as dificuldades variam de forma importante com o tipo de aço. Um aspecto fundamental na soldagem de aços inoxidáveis é a necessidade de limpeza de modo a minimizar contaminações que deteriore a sua resistência à corrosão. Cuidados com a forma do cordão também são muito importantes, uma vez que

irregularidades superficiais podem se tornar pontos de acúmulo de sujeira e início de corrosão. Adicionalmente, as diferenças de propriedades físicas entre os aços comuns e os inoxidáveis, implicam em diferenças nos procedimentos de soldagem. As principais diferenças de propriedades são:

1. Menor temperatura de fusão;
2. Menor condutividade térmica;
3. Maior coeficiente de expansão térmica;
4. Maior resistência elétrica

2.8. DIAGRAMA DE SCHAEFFLER

O diagrama de Schaeffler, Figura 2.6, é um valioso instrumento para a avaliação do depósito de solda. Permite estimar com antecedência a composição química e a estrutura de uma solda de um aço ligado. Permite também escolher eletrodos apropriados para cada soldagem, mesmo heterogênea, de aço liga, aço carbono, aço inox ferrítico, austenítico, etc. Chega-se a comparar a importância do Diagrama de Schaeffler para os aços inoxidáveis à importância do diagrama Fe-C para os aços carbono (BAULY, 2000).

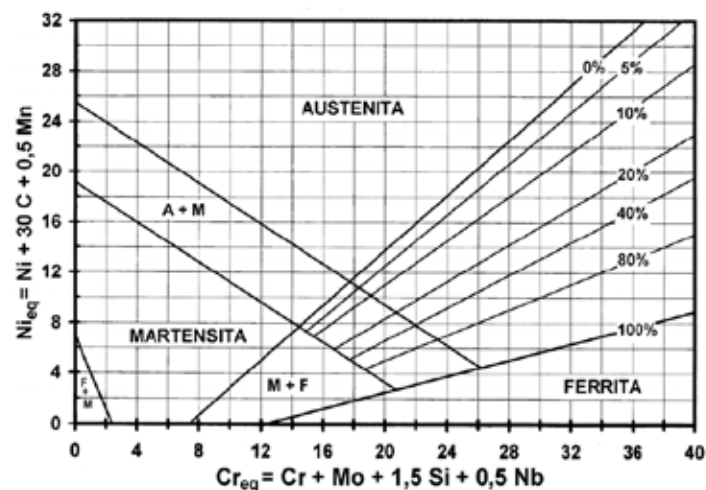


Figura 2.6 - Diagrama de Schaeffler empregado para fazer um prognóstico da microestrutura da solda. Fonte: MONDENESI (2008).

Já existia, para os aços ao cromo e níquel laminados e forjados, desde 1920, um diagrama estrutural, chamado diagrama de MAURER. Porém SCHAEFFLER

modificou e o adaptou à soldagem, utilizando eletrodos revestidos de 4,7mm de diâmetro e diferentes composições de cromo e níquel.

Para utilizá-lo, os equivalentes de Cr e Ni devem ser calculados pela composição química da solda e a microestrutura é determinada pela leitura direta no diagrama do campo onde o ponto (Cr_{eq} , Ni_{eq}) se localiza. Em aplicações em que as composições dos metais base e de adição sejam diferentes, o ponto que representa a solda no diagrama estará sobre o segmento de reta entre o metal base e o metal de adição. A posição desse ponto no segmento dependerá da diluição da solda, ficando mais próximo do metal de adição para soldas de pequena diluição (MONDENESI, 2008).

A Figura 2.7 mostra o Diagrama de Schaeffler indicando áreas típicas de problemas na soldagem de aços inoxidáveis. De forma resumida, estes problemas são:

1. Solidificação com uma estrutura completamente austenítica com uma elevada sensibilidade à formação de trincas durante a solidificação ou por perda de ductilidade acima de 1250°C;
2. Aços com elevado teor de elementos de liga levando à formação de fases intermetálicas após aquecimento entre cerca de 450 e 900°C e, com isto, à sua fragilização;
3. Aços com estrutura ferrítica capaz de sofrer um grande crescimento de grão na ZTA e ZF, sendo, desta forma, fragilizados;
4. Aços de elevada temperabilidade com a formação de martensita na ZTA e ZF causando fragilização e fissuração pelo hidrogênio e por formação de martensita.

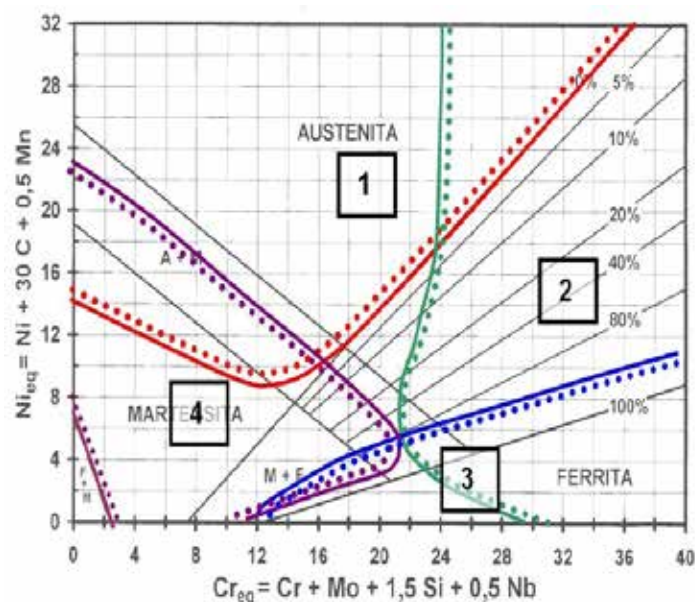


Figura 2.7 - Regiões problemáticas típicas na soldagem de aços inoxidáveis: (1) Formação de trincas de solidificação ou por perda de ductilidade acima de 1250°C; (2) fragilização por formação de fases intermetálicas após aquecimento entre cerca de 450 e 900°C; (3) fragilização por crescimento de grão; e (4) fragilização e fissuração por formação de martensita. Fonte: MONDENESI (2008).

2.9. ESCOLHA DA COMPOSIÇÃO ÓTIMA PARA A ZONA FUNDIDA

Segundo BAULY (2000) em seu trabalho pode-se demarcar regiões de problemas que são característicos na soldagem. As composições químicas das soldagens que caírem dentro dessas regiões tendem a apresentar problemas que são característicos da região. Assim, ao se executar a soldagem deve-se levar em conta primeiramente a prevenção contra o problema indicado.

- Campo 1: Fissuração a quente

O campo engloba basicamente as composições austeníticas. Ocorre em temperaturas acima de 1250 °C. A explicação do fenômeno é que, em ligas austeníticas há possibilidade de formação de fases segregadas, de menor resistência mecânica. Esse fato, aliado a tensões de contração oriundas de uma soldagem, é suficiente para fissurar a solda em temperaturas ainda elevadas. Ocorre basicamente no cordão fundido, embora possa ocorrer também na ZTA.

- Campo 2: Zona da Fase Sigma

Este campo engloba todas as composições de ligas que têm possibilidade de, após longo tempo de permanência à temperaturas na faixa de 500-900°C, fazer surgir uma fase chamada fase sigma, basicamente Fe-Cr, que tem como principal característica uma fragilidade elevada à temperatura ambiente. A fase sigma sendo formada basicamente de ferro e cromo tem mais facilidade de se desenvolver a partir da ferrita, entretanto, também pode ser formada na austenita.

- Campo 3: Zona de Crescimento de Grão

Abrange geralmente a região dos aços inoxidáveis ferríticos, ao cromo e com baixo teor de carbono. O problema é o crescimento irreversível dos grãos, quando o aço está aquecido a temperaturas maiores que 1150°C. Esse crescimento irreversível dos grãos é mais acentuado na zona termicamente afetada, resultando em fragilização.

- Campo 4: Zona de Fissuração a Frio

Esse campo abrange as estruturas martensíticas e parte das estruturas mistas martensíticas-austeníticas e martensíticas-ferríticas. São normalmente os aços temperados ou temperados e revenidos, com teores mais altos de carbono e os revestimentos duros que são os problemas desse campo. A fissuração a frio (abaixo de 400°C) ocorre nesses aços devido a coexistência dos três fatores: estrutura metalúrgica martensítica, tensões e hidrogênio. A fissuração normalmente se localiza na zona termicamente afetada pelo calor da junta soldada, mas pode ocorrer no cordão de solda.

- Região Central: Sem Problemas

No centro do diagrama existe uma região que não pertence a nenhum dos quatro campos. As composições químicas que pertencem a essa região indicam que a liga está livre dos quatro efeitos citados.

O objetivo então é tentar fazer com que a composição química da zona fundida ocorra dentro dessa região, embora esse procedimento não resolva a situação para a zona termicamente afetada, cuja composição química é a do metal de base.

Os parâmetros a controlar para alcançar esse objetivo são basicamente, a escolha do eletrodo (metal de adição, fluxo, etc) e o controle da diluição (participação do metal de base) pela seleção apropriada dos parâmetros de soldagem utilizados (BAULY, 2000).

2.10. CORROSÃO SOB TENSÃO (CST)

A corrosão sob tensão acontece quando um material submetido à tensão de tração (aplicada ou residual) é colocado em contato com um meio corrosivo específico. As condições metalúrgicas do material como dureza, encruamento, fases presentes, são fatores frequentemente decisivos. A tensão de tração deve necessariamente ser maior que certo valor limite. FERNANDES (2010)

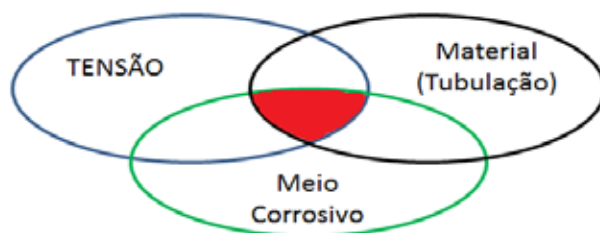


Figura 2.8 - Condições mínimas para a ocorrência de CST. Fonte: FERNANDES (2010) – Com adaptação.

Estas tubulações, de acordo com MARQUES et al. (2009), na presença de um ambiente agressivo, trincas de corrosão podem se desenvolver de forma acelerada devido à presença de tensões de tração. No caso de aços estruturais ao carbono ou de baixa liga, por exemplo, a corrosão sob tensão é desencadeada pelo contato com hidróxidos ou com sulfeto de hidrogênio. Em estruturas soldadas, as tensões residuais são muitas vezes suficientes para o desenvolvimento de corrosão sob tensão, dependendo do material e do ambiente.

A corrosão sob tensão resulta da ação combinada da aplicação de uma tensão de tração e de um ambiente corrosivo (CALLISTER, 2008). Como a ocorrência deste processo necessita da associação destes dois fatores, meio corrosivo e da tensão estática de tração (NUNES, 2007).

E no caso específico, temos um meio altamente propício à corrosão sob tensão em aço carbono, bastando apenas pequenas tensões oriundas do projeto (flexibilidade das tubulações), oriundas da montagem (tensões de soldagem) ou ainda oriundas da operação (tensões internas) para desencadear o processo de corrosão sob tensão.

Segundo NUNES (2007), normalmente associado à corrosão sob tensão obtemos a fragilização por hidrogênio gerado a partir da reação:



A Eq. (2.3) mostra a formação de hidrogênio a partir da reação entre o ferro e a soda cáustica.

De acordo com GEMELLI (2001), a fissuração sob tensão provocada pelo hidrogênio ocorre por efeito combinado do hidrogênio e de tensões residuais e/ou de tensões externas. Além disso, os aços austeníticos são mais resistentes à fragilização pelo hidrogênio do que os aços ferríticos: no ferro α , o hidrogênio pode se difundir mais facilmente para a zona de tensão máxima, na frente da fissura. Entretanto, outros fatores podem influenciar principalmente os mecanismos de deformação plástica, que diferem entre metais de estrutura CFC (cúbico de face centrada) e CCC (cúbico de corpo centrado).

Como as trincas iniciais são pontos de concentração de tensão e estas propiciam aumento de tensão localizada, temos então uma acelerada progressão nas trincas até o afloramento na superfície e o consequente vazamento do licor pobre. As trincas se manifestam de modo transversal ao cordão de solda (ver Figura 2.9).



Figura 2.9 – Trincas em tubulação de aço carbono, linhas de licor pobre da área 04A da Hydro-Alunorte.

O aço carbono sob temperaturas elevada é sensível à corrosão sob tensão em meios alcalinos (GEMELLI, 2001). Porém, os meios levemente básicos são muito favoráveis à resistência à corrosão para aço carbono (NUNES, 2007), que é o nosso caso, onde o material usado nas tubulações é o aço ASTM A 106 Gr. B. Segundo NUNES (2007), para meios extremamente básico e o ferro apresenta uma característica em seu diagrama de Pourbaix mostrando uma zona de corrosão nesta faixa de pH acima de 12. A Figura 2.10 a seguir apresenta um diagrama de Pourbaix mostrando esta região de instabilidade que autores costumam denominar de fendimento por álcalis.

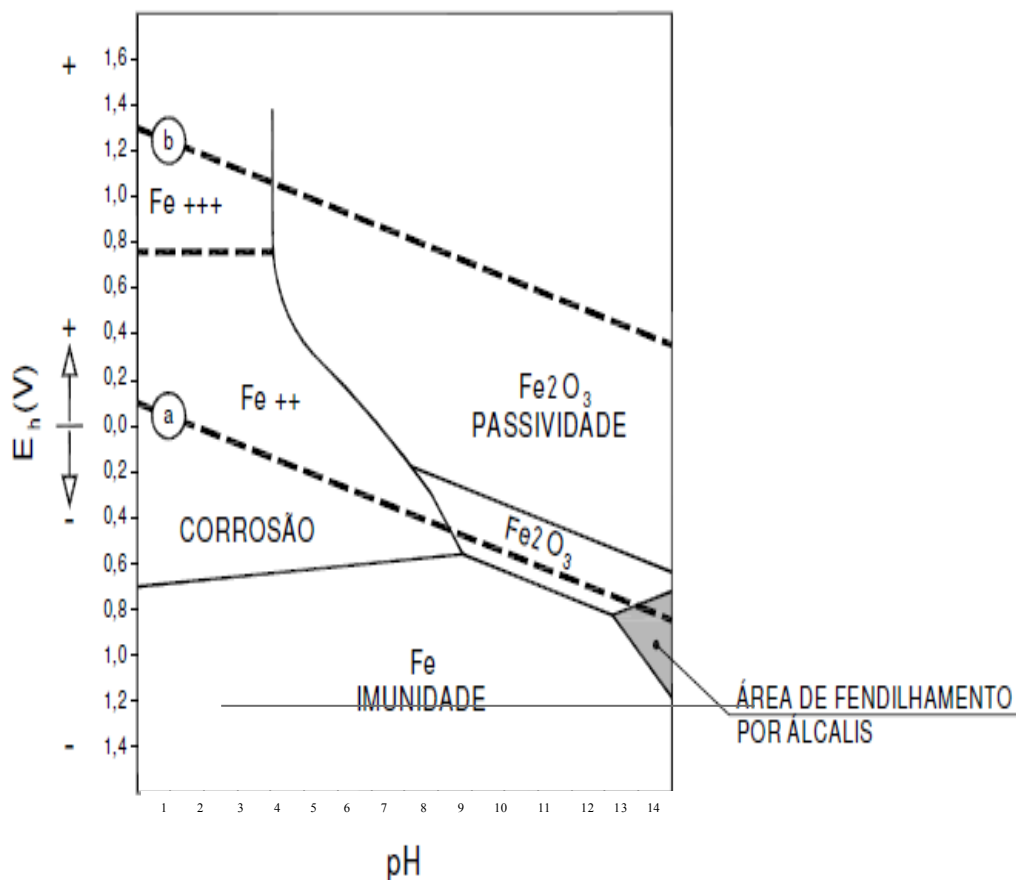


Figura 2.10 – Diagrama de Pourbaix (com adaptação). Fonte: NUNES (2007).

Esta anomalia fica ainda mais acentuada quando associada à temperatura e nestas circunstâncias o material torna-se extremamente suscetível a corrosão sob tensão. A Figura 2.11 abaixo apresenta um diagrama de concentração de álcalis e temperatura, mostrando a suscetibilidade à corrosão sob tensão.

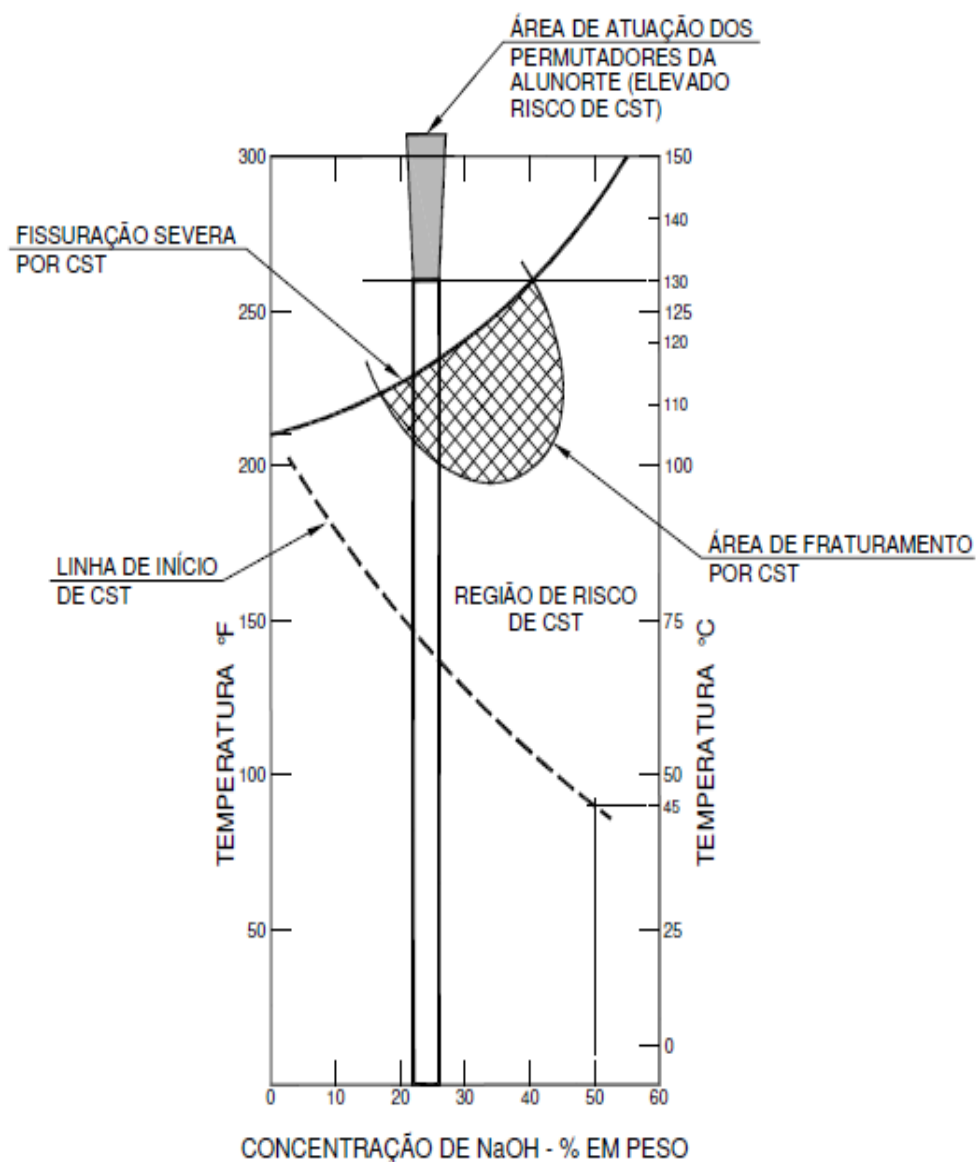


Figura 2.11 – Diagrama de concentração de álcalis e temperatura. Fonte: NUNES (2007).

A Figura 2.12 mostra a região de aplicação com segurança do aço carbono sem alívio de tensões (região A), a área de aplicação com segurança do aço carbono com alívio de tensões (região B), e a região onde o aço carbono não resiste e outros materiais são mais indicados (região C).

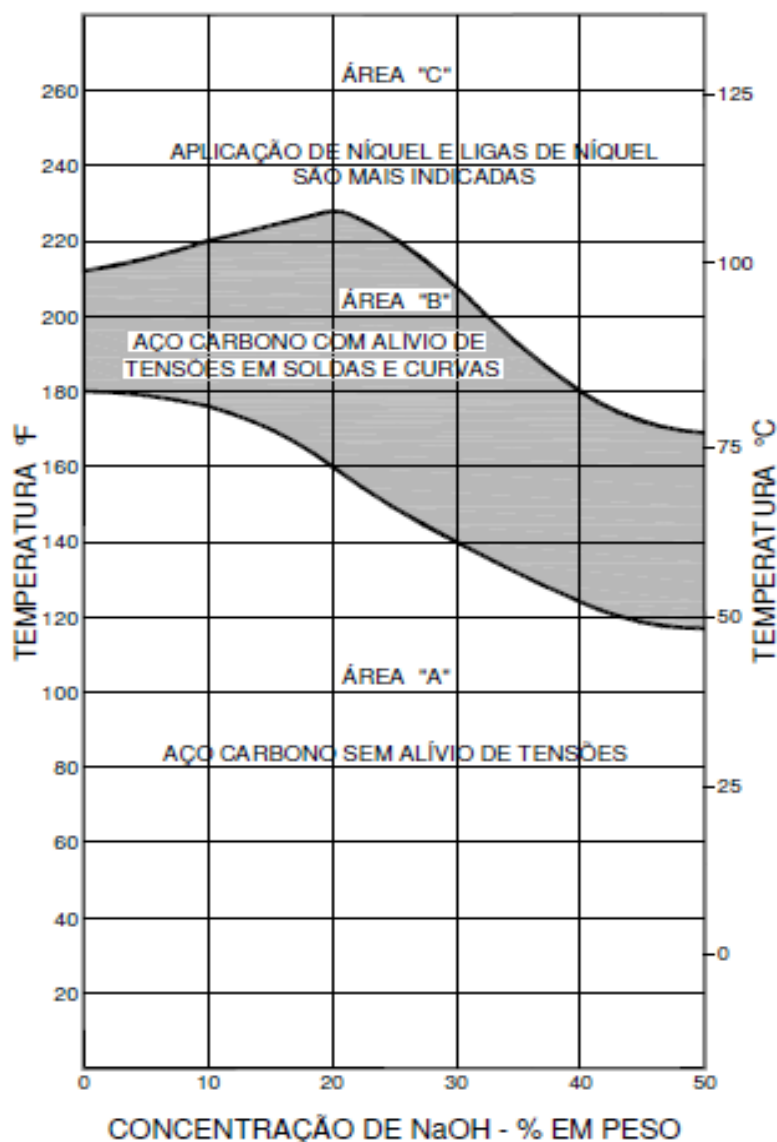


Figura 2.12 – Aplicação do aço carbono em função de concentração de álcalis e temperatura. Fonte: NUNES (2007).

O níquel comercial, que é o metal quase puro, é usado principalmente para serviço severo com cáusticos, por ser o material industrial de melhor resistência à soda e outros cáusticos em altas concentrações ou em temperatura elevada (TELLES, 2010).

As ligas de alto teor de níquel são imunes à corrosão sob tensão, porém são economicamente menos atraentes devido ao alto custo (GENTIL, 2011). Através disso, observou-se que poderíamos incluir níquel nas juntas destas tubulações.

Estudos experimentais de problemas decorrentes da corrosão sob tensão são de grande importância à medida que estes permitem fazer uma previsão do comportamento dos materiais expostos ao meio agressivo, avaliando a influência de vários parâmetros que conduzem à iniciação e propagação de trincas por CST (corrosão sob tensão). Nesse sentido, a função dos ensaios de CST é a de fornecer informações sobre o comportamento do material a corrosão em menor tempo se comparado que aquelas obtidas através de experiências em serviço.

Com isto, é possível antecipar medidas para reduzir a susceptibilidade do material a CST. No entanto, para se avaliar a susceptibilidade a CST de um determinado material é necessário determinar os parâmetros de degradação através de ensaios padronizados e normas específicas para esse fim. (FERNANDES, 2010).

Dependendo da microestrutura presente, o trincamento por corrosão sob tensão pode ocorrer nos contornos de grão (intergranular) ou através do grão (intragranular), dependendo da microestrutura (Figura 2.13), resultando em fraturas intergranulares ou transgranulares. Além disso, dependendo das condições, podem ocorrer fraturas mistas devido à ocorrência de fissuras que seguem os contornos de grão e outras que atravessam o grão (FERNANDES, 2010).



Figura 2.13 - Trincamento por corrosão sob tensão: (a) trincas intergranulares, (b) trincas transgranulares, (c) trincas mistas, transgranulares e intergranulares. Fonte: GEMELLI (2001).

2.11. LICOR CÁUSTICO

Segundo CARNEIRO (1993), o licor também denominado de “Licor Bayer”, é a solução principal que circula em circuito fechado em uma fábrica de alumina, operando pelo processo Bayer. É uma solução aquosa composta de soda cáustica, carbonato de sódio, aluminato de sódio e impurezas tais como orgânicos, que lhe conferem uma coloração marrom escura. Conforme a relação alumina/cáustico, alta ou baixa, o licor é denominado respectivamente rico ou pobre. Das impurezas usualmente presentes e mais importantes são:

SiO₂	0,3 a 0,6 gpl
Na₂C₂O₄ (Oxalato de Sódio)	3 a 4 gpl

As demais são os outros sais orgânicos de sódio (Acetato, etc.) e inorgânicos (Cloreto, Sulfato, Nitrato, Fosfato, etc.) todos na faixa de 0 a 5 gpl cada.

A soda em solução é usualmente expressa em NaOH e calculada em Na₂CO₃ equivalente.

2.12. METALOGRAFIA

Do ponto de vista metalúrgico, soldagem é uma operação complexa, tendo em vista que as transformações ocorrem com o aço no estado sólido durante o aquecimento e resfriamento. Na verdade, o ciclo térmico de soldagem não é muito comum quando comparado com os tratamentos térmicos usuais, no qual a taxa de aquecimento é elevada e o tempo de tratamento é curto, o que leva o metal de solda a elevadas temperaturas, tornando o metal de solda um local com elevado gradiente térmico. (ASSUNÇÃO, 2013).

Devemos lembrar que a curva de resfriamento contínuo é particular para cada tipo de aço. Por exemplo, quanto maior o teor de carbono e de elementos de ligas, mais para a direita a curva se desloca, facilitando assim a têmpera.

Para identificar os constituintes formados depois do resfriamento nas juntas soldadas, utilizamos o recurso da microscopia ótica (MO). A caracterização dos constituintes baseia-se na identificação da forma, distribuição, tamanho e coloração das fases.

2.13. ENSAIOS DE MICRODUREZA

Segundo CALLISTER (2008), os ensaios de dureza são realizados mais frequentemente do que qualquer outro ensaio mecânico por diversas razões:

- Eles são simples e baratos – normalmente, nenhum corpo-de-prova especial precisa ser preparado e o equipamento de ensaio é relativamente barato;
- O ensaio é não-destrutivo – o corpo-de-prova nem é fraturado nem excessivamente deformado; uma pequena impressão é a única deformação;
- Outras propriedades mecânicas podem, com frequência, ser estimadas a partir dos dados de dureza, tal como o limite de resistência a tração.

As durezas por choque e por penetração são as mais utilizadas na engenharia, sendo que esta é a mais largamente utilizada e citada nas especificações técnicas. Deste modo, o ensaio por choque ou por rebote conforme GARCIA et al. (2000) é classificado dinâmico devido à impressão na superfície ser efetuada mediante a queda livre de um êmbolo com uma ponta padronizada de diamante. A dureza por penetração é o tipo de ensaio mais comum na caracterização das propriedades mecânicas. Seus tipos mais comuns são dureza Rockwell e Brinell e microdureza Vickers e Knoop.

Tratando-se de microdureza, este tipo de ensaio favorece situações, onde as condições práticas necessitam determinar a dureza de corpos de prova de pequenas áreas. Exemplos dessas ocorrências são as medidas do gradiente de dureza em peças cementadas e também na determinação da dureza individual de microconstituintes de uma estrutura metalográfica, conforme as afirmações de GARCIA et al. (2000).

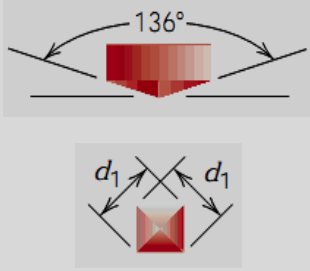
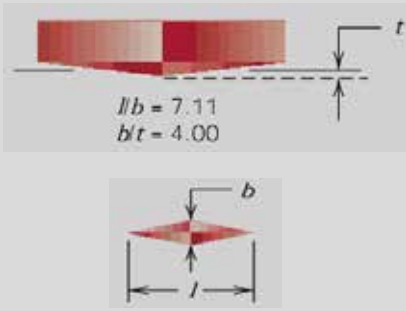
O ensaio de microdureza produz uma impressão de dimensões microscópicas através do uso de penetradores de diamante e cargas menores que 1 kgf. A microdureza Vickers utiliza o mesmo procedimento de medição de dureza, enquanto que o método Knoop utiliza um penetrador de diamante na forma de uma pirâmide alongada, através da relação 7:1 entre as diagonais, maior e menor (Tabela 2.1).

Este ensaio é usado para a determinação da dureza de materiais frágeis e de camadas finas. Para a realização do ensaio de microdureza de modo geral requer uma preparação cuidadosa do corpo de prova.

Finalmente, a dureza também permite a existência de correlações com outras propriedades como a dureza Brinell e o limite de resistência a tração, assim como a dureza Vickers e o limite de proporcionalidade.

Estas relações são úteis em circunstâncias em que é necessária uma estimativa da resistência de um material e não se dispõe de um equipamento de ensaio de tração, ou em caso contrário a esse. Na prática, embora não sejam necessariamente precisas, constituem ferramentas úteis neste sentido.

Tabela 2.1 – Comparativo entre os testes de Microdureza. Fonte: ASSUNÇÃO (2013).

Microdureza	Tipo de ponta da Impressão	Carga	Aplicação	Vista Lateral e Superior da Ponta de Impressão
Vickers (HV)	Pirâmide de diamante, base quadrada e 136°	De 1 a 1000 gf	Camadas superficiais, folhas finas, arames, fases microscópicas, zona termicamente afetada (ZTA) em soldas	
Knoop (HK)	Pirâmide de diamante, base rômbica (razão 7:1)			

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. FABRICAÇÃO DAS PEÇAS

Para realização deste trabalho usou-se uma máquina de solda tipo retificadora do fabricante ESAB. O gás utilizado no processo TIG (Tungsten Inert Gás) foi o argônio (100%) com uma vazão de 10 l/min para realizar a solda de raiz da junta. A corrente aplicada neste processo foi do tipo C.A. (Corrente alternada). O diâmetro do eletrodo de tungstênio foi de 1/8" (polegadas) e varetas (ER70S-6) com diâmetro 1/8". O consumo médio de varetas foi de 0,5 kg para cada junta de 18" SHC80.

O material de aplicação para fabricação da junta foram tubulações 18" (polegadas) com Schedule 80; curvas de 18"; Te de 18" e flanges de pescoço de 18" (polegadas) na classe de pressão de 300#.

O corte dos tubos foi realizado com auxílio de kit oxi-corte motorizado. A Figura 3.1 mostra a utilização deste equipamento.



Figura 3.1 – Conjunto oxi-corte motorizado.

A junta usada para união das tubulações foi a de topo com chanfro em “V”, conforme a Figura 3.2 abaixo:

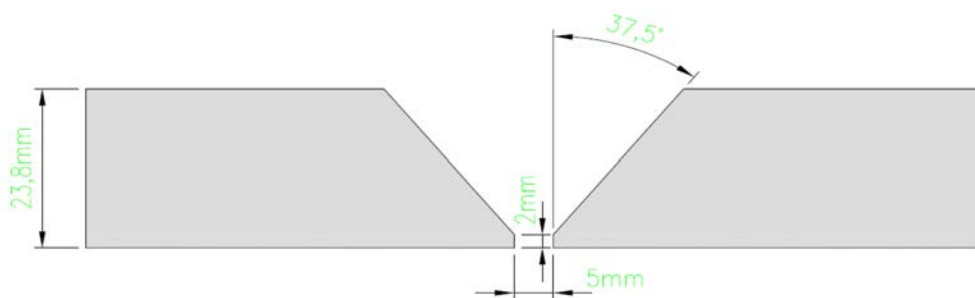


Figura 3.2 – Ilustração da Junta de topo com chanfro em “V” usada para a fabricação das peças.

A preparação do chanfro foi com auxílio de uma lixadeira e discos de desbaste. A Figura 3.3 a seguir ilustra este processo.



Figura 3.3 – Preparação do chanfro em “V”.

A Figura 3.4 abaixo mostra a solda de raiz entre um flange de pescoço e um TE.



Figura 3.4 – TE com solda de raiz.

Todas as soldas de raiz receberam o ensaio de líquido penetrante. Após a etapa de ensaio a peça passava pelo processo de limpeza para receber a contra solda.



Figura 3.5– Limpeza da solda de raiz e preparação da superfície para receber a contra solda.

Após etapa de contra solda. Inicia-se o processo de enchimento e acabamento. A Figura 3.6 mostra uma das peças finalizada.



Figura 3.6 – Peça aguardando instalação.

As soldas de enchimento e acabamento foram realizadas a arco com eletrodo revestido, onde o eletrodo usado foi E309L-17 com diâmetro de 4mm para enchimento, 3,2 para acabamento e 2,5 para contra solda. A corrente usada no eletrodo de 4mm foi de 160A, no de 3,2 foi de 120A e de 2,5 foi de 90A. Além disso, a corrente foi do tipo C.A. (Corrente alternada). A velocidade de soldagem aproximada foi de 120mm/min. O consumo médio de eletrodos revestidos foi de 10 kg para cada junta de 18” SHC80.

Como Equipamentos de Proteção Individual - EPI's foram usados: luva de couro, avental de couro, perneiras de couro, manga de couro, botas de segurança, capacete com filtro, ombreira de couro;

Para manter o eletro aquecido em campo foi usada estufa portátil;

3.1.1. Metal de adição

Abaixo segue as características do metal de adição (aço inoxidável) utilizado nesse trabalho:

- AISI 309L

Segundo a EUTECTIC, o eletrodo é do tipo Cr/Ni usado para soldagem de aços dissimilares – aços carbono/inox. E possui excelente combinação entre resistência mecânica e alongamento, utilizado principalmente em peças de elevada espessura.

Características Mecânicas (Valores Típicos). (EUTECTIC, 2006)

- Resistência a tração (MPa): 520
- Alongamento (%): 30
- Dureza (HB): 200

a) Aplicação do eletrodo 309L

Estampos de forjarias, reparos em caçambas e soldagem de aços carbonos, aços ligados, aços manganês e aços inoxidáveis. (EUTECTIC, 2006)

METAL DEPOSITADO	APLICAÇÕES	PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS	POSICÃO SOLDAGEM	TENSÃO/ TIPO CORR.	DIÂM. (mm)	COMPR. (mm)	FAIXA DE CORRENTE (A)
C 0,03 Si 0,85 Mn 1,03 Cr 23,86 Ni 12,26 Mo 0,19	Eletrodo de aço inoxidável com elevado teor de liga, A 31 - 33% destinado a soldagem de aços dissimilares e inoxidáveis com composições similares. O OK 67.61 possui excelentes características operacionais em todas as posições, exceto na vertical descendente, tanto em CA como em CC.	L.R. 700-750 MPa		28 - 31V CA $\geq$ 70V CC+	2,5 3,25 4	300 350 350	50 - 90 90 - 120 140 - 160

Figura 3.7 – Informações sobre o Eletrodo utilizado na Soldagem. Fonte: ESAB (2011).

3.2. EQUIPAMENTOS DE CORTE, USINAGEM E ENSAIOS MECÂNICOS

Este item aborda todo o maquinário utilizado para realizar o ensaio mecânico de microdureza e composição química. Sendo que antes de todos os corpos de provas estarem aptos para tais, necessitaram ser cortados e usinados de acordo com as normas previstas e específicas, dessa forma será visto antes os equipamentos de usinagem e corte.

3.2.1. Serra de Fita

Máquina semiautomática de serrar, responsável pelo corte dos corpos de prova. Com sistema de refrigeração para fluido de corte ou água e com acionamento de dispositivo de segurança.

- Modelo: BS912
- Fabricante: Powermaq
- Velocidade da Lâmina (m/min): 50-60 Hz – 4 etapas
- Potência do motor: 1HP
- Sistema de Refrigeração

3.2.2. Equipamento de Análise da Composição Química

Os elementos químicos presentes na composição do material (Aço ASTM A106 grau B), os percentuais destes elementos foram medidos por espectrômetro de emissão ótica que utiliza o método por absorção dos feixes de elétrons. A exigência do equipamento foi o uso de corpos de prova com a superfície semi-polidas e o tamanho circunferencial da amostra.

3.2.3. Equipamento de Microdureza

O equipamento utilizado para medir a dureza do material foi um microdurômetro da marca MHV 2000 com microscópio ótico acoplado para a visualização dos corpos de prova. Este equipamento foi cedido através de uma parceria com o campus de Marabá da Universidade Federal do Pará.

3.2.4. Equipamentos para o Ensaio Metalográfico

Por se tratar de um ensaio minucioso em que se precisa de uma gama de critérios práticos visando bons resultados, a prática metalográfica requer equipamentos secundários até ser finalizada após a obtenção das imagens, por isso a listagem a seguir dos equipamentos ou práticas que precedem o ensaio.

3.2.5. Lixadeira Politriz Metalográfica

Este equipamento é utilizado para lixar e polir os corpos de prova após o corte, as especificações abaixo correspondem ao que foi utilizado.

- Modelo: PLFDV
- Fabricante: Fortel
- Painel Eletrônico
- Velocidade Variável: 0 - 800 RPM

3.2.6. Microscópio Ótico

As imagens polidas e atacadas com a solução pré-estabelecida foram levadas ao equipamento ótico de análise de imagem. Através deste foram retiradas as imagens que serviram para o estudo da microestrutura presente nas seguintes regiões: Metal de Base (MB), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Zona Fundida (ZF).

- Microscópio Ótico: Luz refletida e transmitida, trinocular, ampliação de até 1000X; usado para a análise micrográfica;
- Fabricante: Olympus;
- Modelo: BX51;
- Capacidade Máx.: 1000X;
- Software de Aquisição de Imagem: analySIS Imager 5.1

Corte e Usinagem dos Corpos de Prova: Nesta etapa do trabalho demandou maior precisão, pois se realizou o corte seguido da usinagem; fase esta que visava a adequação das peças aos padrões das normas segundo a ASTM (padrão adotado como referência para este trabalho), exigência tal que confere a confiabilidade dos ensaios mecânicos e químicos de análise.

3.3. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Conforme o objetivo traçado para o trabalho em discussão, trata-se da caracterização das soldas obtidas de acordo com os processos de união do material selecionado, ou seja, um comparativo entre peças com adição de níquel/cromo e outro sem adição desse material, tais propriedades aumentam a resistência do material ou a negação de tal observação.

Com isso, avaliaremos as diferenças nas características químico-mecânicas entre os corpos de prova em aço carbono e quando se adiciona níquel e cromo.

As devidas posições de retirada dos corpos de prova das chapas teste ocorreram de forma normalizada segundo a ASME Seção IX (FBTS, 2v, p.12, 2007), o que se tenta repassar a garantia de que as amostras não obedeceram a uma representação tendenciosa de seus elementos, indicada pela aleatoriedade da forma de como foram escolhidas e retiradas de uma amostragem global.

Um esquema que possa representar a ideia do texto acima é mostrado na Figura 3.8. Já as práticas normalizadas para a realização dos ensaios mecânicos, a metalografia e a análise da composição química dos metais serão discutidos nos itens adiante.

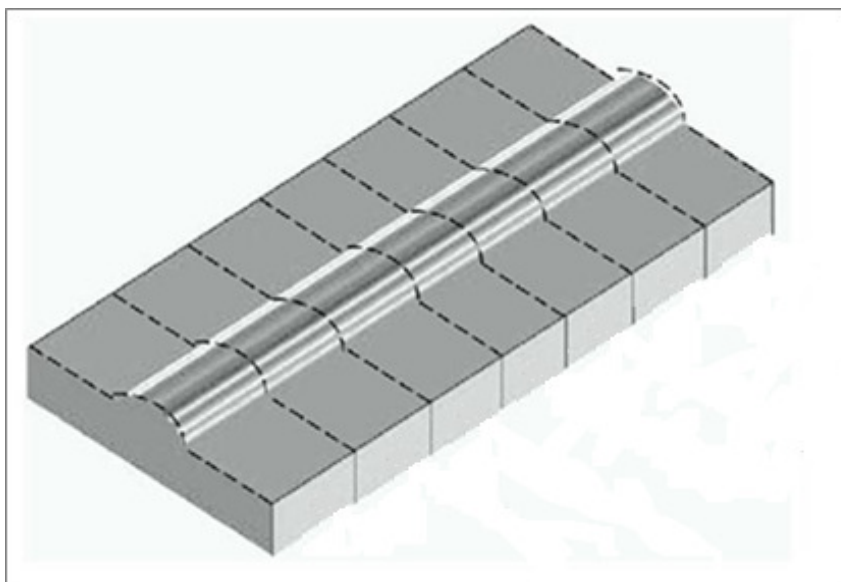


Figura 3.8 – Disposição da retirada dos corpos de prova para os ensaios mecânicos e metalografia.

3.3.1. Análise da Composição Química

Para constatar os percentuais dos componentes no material foram realizadas as análises químicas do metal de base. Os resultados destes exames foram determinados por espectrometria ótica, que tem por princípio a queima localizada do material a ser analisado, e este libera um gás o qual processado corresponde a sinais que pode ser interpretados como a composição química ou elementos presentes do material metálico, dados em percentagem, informando também o carbono equivalente. Foram realizadas duas (02) queimas em cada amostra, e retirada a média dos valores encontrados.

3.3.2. Ensaio de Microdureza

O método utilizado para medir as durezas das regiões que compõe a junta soldada (MB, ZTA, ZF) seguiram os procedimentos padrões normalmente utilizados. Iniciando-se com a limpeza e polimento da peça, logo a dureza do material foi medida a partir dos pontos planejados conforme a Figura 3.9, que é uma representação esquemática de onde seriam esses pontos. A carga inicial aplicada foi de 0,3kgf durante 15s. Os valores de dureza fornecidos são do tipo Vickers assim como o método Knoop, onde a norma da AWS (2007) afirma que este tipo de dureza é indicado para amostras de soldas passe simples ou multipasses, devido as dimensões das regiões analisadas e o tamanho do indentador.

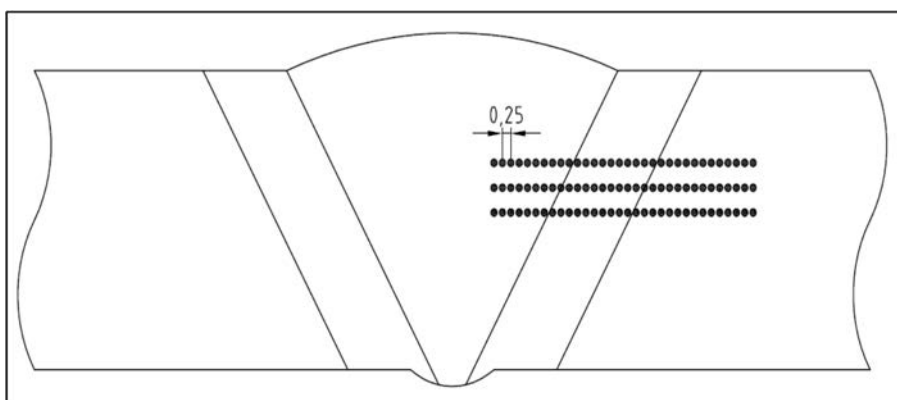


Figura 3.9– Representação esquemática da distribuição dos pontos onde foram medidos a dureza.

Este ensaio ocorreu no sentido da direita para esquerda, respeitando um espaçamento entre as endentações de 0,25mm.

3.3.2.1 Ensaios Metalográficos

Os ensaios metalográficos são procedimentos empregados para revelar várias fases presentes dentro de todas as regiões do revestimento (metal de solda, zona afetada pelo calor e metal de base).

Nesta etapa da avaliação da junta soldada, procurou-se relacionar as propriedades mecânicas com a estrutura metalúrgica e a sua composição química, mediante uma análise do aspecto microscópico.

Cada amostra foi lixada em uma máquina de polimento, utilizando lixas d'a água com granulometria de 80, 100, 220, 320, 400, 600, 1200, fazendo uma mudança na direção de lixamento de 90° ao mudar para uma lixa de menor granulometria, exercendo uma pressão mínima necessária. Finalmente as superfícies foram polidas de maneira semiautomática utilizando pasta de diamante de 3 µm e 1 µm.

As amostras polidas foram atacadas com uma solução de Nital 2% por 20 segundos, secas com ar quente e posteriormente se obtiveram as imagens destas superfícies mediante um panorama prévio da superfície com resolução de 100X, 200X e 500X.

Nesta etapa deve se avaliar a microestrutura de todas as regiões da junta soldada, havendo um maior interesse na região da ZTA e metal de solda. Observando as possíveis formas microestruturais adquiridas sujeitando-as às comparações com as imagens micrográficas padrões do Metals Handbook ou do IIW.

3.3.2.2 Macrografia

Através do seccionamento transversal dos corpos de prova foram obtidas amostras com 12 mm de espessura, 6,5 mm de altura e 50 mm de largura.

Estas amostras foram retiradas a uma distância de 150 mm a partir do início do cordão. Foram, então, preparadas com lixas de granulometrias gradativamente menores

(100, 120, 320, 400 e 600 mesh), e atacadas com NITAL 2% durante 15 segundos, sendo em seguida lavadas em água corrente e secas utilizando ar quente.

As características geométricas do depósito foram medidas através da seção transversal dos cordões com o auxílio de um sistema de aquisição de imagens e através de um software comercial.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo, analisa os resultados experimentais (respostas) decorrentes da compatibilidade do metal de adição e procedimentos, além de avaliar tais resultados através de ensaios como: macrografia, composição química, metalografia, microdureza e alguns diagramas encontrados na literatura.

Foi observado neste trabalho problemas de corrosão sob tensão do aço em presença de soda, com concentração e temperatura que tornam as peças (tubulações e acessórios) extremamente sensível ao processo corrosivo, com aparecimento de trincas, especialmente nas regiões de solda.

A substituição do material de aplicação de construção é uma solução possível, porém sempre muito mais cara e de difícil execução que a utilização de aço carbono, principalmente em um projeto já em operação.

Como o processo de fabricação das peças anteriormente usadas ocasionava diversos problemas com furos, então surgiu à ideia deste trabalho.

4.1. AVALIAÇÃO DO METAL DE ADIÇÃO

A seleção do metal de adição surgiu a partir de ensaios empíricos de soldabilidade e pesquisa na literatura. O Principal embasamento teórico foi através do diagrama schaeffler.

4.2. DIAGRAMA DE SCHAEFFLER E DELONG

Diagrama de schaeffler para a condição otimizada

Quando traçamos o diagrama de previsão das fases da zona fundida (diagrama de Shaeffler), podemos constatar que a previsão da microestrutura formada na solda cairá na região (nos campos da austenita mais ferrita com fases de martensita) que não é

afetada por nenhum dos problemas de soldabilidade. Esta região é considerada como ideal sob o ponto de vista de soldabilidade para a composição da solda (Figura 4.1).

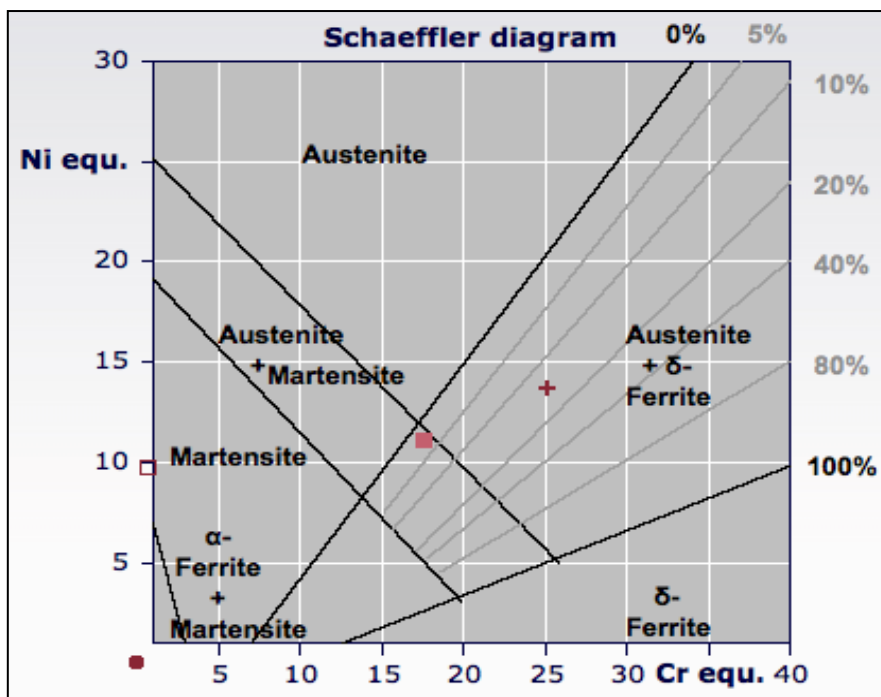


Figura 4.1 - Diagrama de Shaeffler mostrando as regiões de desenvolvimento de problemas típicos na soldagem, para a condição otimizada. Fonte: EWM (2015).

Considerando o estudo da utilização de soldas de aço inox, foi verificado o efeito da adição de Cromo e Níquel na microestrutura do cordão de solda, já que os mesmos auxiliam no combate a corrosão sob tensão. Com os valores obtidos através da análise química foi possível plotar os diagramas de Schaeffler e DeLong, nas figuras 4.9, pode-se observar os valores inseridos em software gratuito para plotagem dos diagramas, de composição química do metal de base (A 106) e metal de solda (309L).

É importante ressaltar que da tabela 4.2 foi retirado o valor de diluição (δ), pois este resultado é um dos fatores que influenciam o deslocamento dos pontos do diagrama de Schaeffler. Além do valor da diluição, de acordo com Modenesi (2001) a relação Cr/Ni pode estimar aproximadamente os microconstituintes que serão identificados nas micrografias, para o caso estudado teremos o valor de 2,76, ou seja, tem-se a presença de austenita e ferrita na microestrutura da solda.

Com os valores de análise química da Tabela 4.2, pode-se calcular os valores de cromo e níquel equivalente para identificação da região em que se localizaram nos diagramas os pontos do metal de solda, metal de base e zona fundida.

Na Figura 4.2, pode-se observar o diagrama de Schaeffler para a soldagem com aço inox, neste verificamos que para a zona fundida teremos a presença de Austenita e Ferrita na microestrutura do mesmo, além da probabilidade de 12% de Ferrita. Confirmando o valor calculado da relação Cr/Ni os microconstituintes do metal de solda descrito através do diagrama foram Austenita e Ferrita, no entanto, para valores altos da relação Cr/Ni podemos identificar na microestrutura Ferrita em Espinhas e Ferrita Laminar (MONDENESI, 2001).

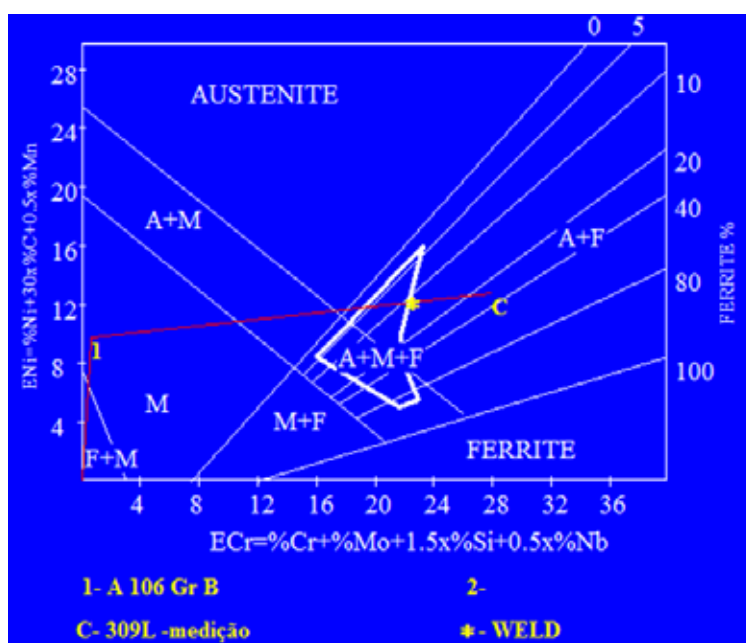


Figura 4.2 – Diagrama de Schaeffler com plotagem para experimento com inox 309L.

Na Figura 4.3, pode-se observar o diagrama de DeLong para a soldagem com aço inox, neste verificamos que para a zona fundida teremos a presença de Austenita e Ferrita na microestrutura do mesmo, além da probabilidade de 13,4% de Ferrita. Confirmando o valor calculado da relação Cr/Ni os microconstituintes do metal de solda descrito através do diagrama foram Austenita e Ferrita, no entanto, para valores altos da relação Cr/Ni podemos identificar na microestrutura Ferrita em Espinhas e Ferrita Laminar (MONDENESI, 2001).

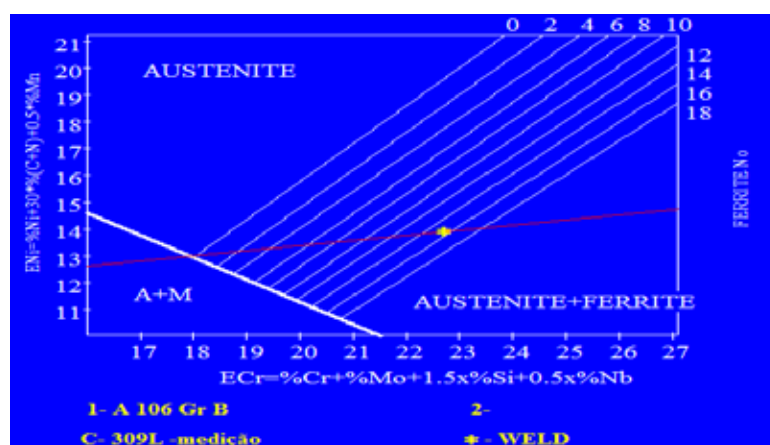


Figura 4.3 – Diagrama de DeLong com plotagem para experimento com inox 309L.

Schaeffler				DeLong				
Calculated structure: Austenite + Ferrite, 12.0% Ferrite				Ferrite Number: 15.5 Ferrite Content: 13.4%				
Warnings: Brittle. 500 - 900°C				Corrosion index (%Cr + 3.3x%Mo +16x ppmN) PRE				
				A 106 Gr B 0.90				

				309L - medição 28.07				
				Weld Metal 22.71				
WRC-92								
Ferrite Number: 9.2								
Weld Metal								
%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%Nb	%Cu	ppm N
0.133	0.80	0.72	21.29	7.76	0.16	0.02	0.13	562
	ECr	ENi		ECr	ENi		ECr	ENi
Schaeffler:	22.66	12.10	DeLong:	22.66	13.79	WRC-92:	21.46	13.57

Figura 4.4 – Valores obtidos dos Diagramas de Schaffer e DeLong para experimento com inox.

4.3. PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

O procedimentos e padrões de soldagem obtidos neste trabalho, foram obtidos através de ensaios com corpos de provas e inspeção visual do cordão, tendo como base a norma ABNT NBR 14842:2015.

Durante os testes com os corpos de prova, observou-se uma melhor penetração na solda de raiz, através do processo TIG, utilizando varetas com 70S. Pois quando se usou a vareta 309L, a mesma apresentou porosidade e falta de penetração. Haja vista que não houve a purga no sistema (Eliminação de gases). Além disso, é inviável deixar o ambiente totalmente inerte para receber esta solda de raiz em campo, já que teríamos um custo elevado com gás e não seria muito eficiente devido a diversas interligações deste duto.

O procedimento usado para enchimento e acabamento foi o eletrodo revestido. Tendo invista que o eletrodo 309L já era item de estoque. Com isso, foi preciso apenas adequar os parâmetros de soldagem a nossa necessidade. Pois precisávamos unir dutos em aço carbono com eletrodo de inox.

4.4. AVALIAÇÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS

4.4.1. Macrografia

Com o ensaio de Macrografia foi possível observar a penetração e a diluição do material soldado, além disso, foi possível fazer uma avaliação visual do cordão (reforço e sua raiz).

As diluições nos corpos de prova usando o aço inox como metal de adição e outro com apenas aço carbono. Sabemos que o controle da diluição é importante na soldagem de metais dissimilares. Na Figura 4.5 abaixo, podemos observar esse comparativo.

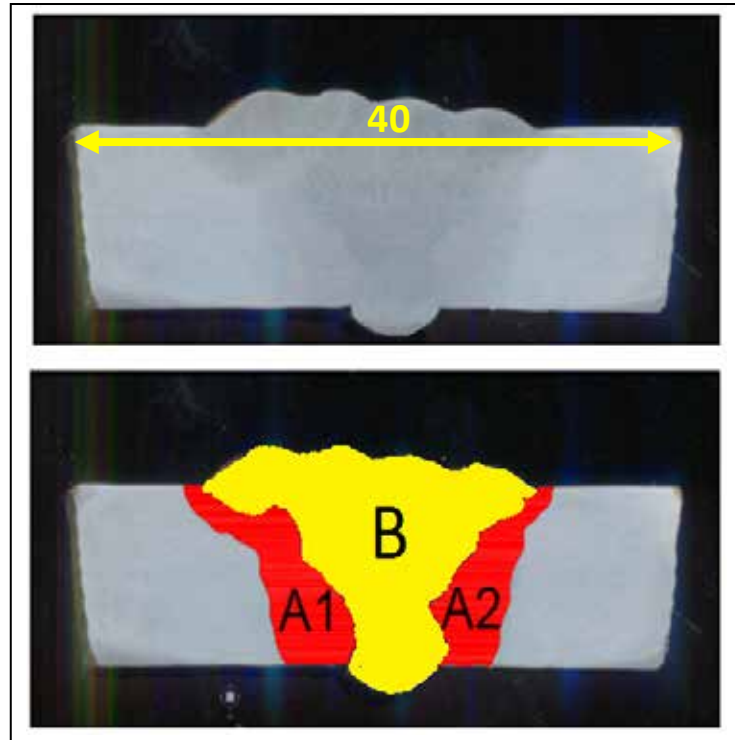


Figura 4.5 – Secção transversal do Corpo-de-prova Soldado sem inox.

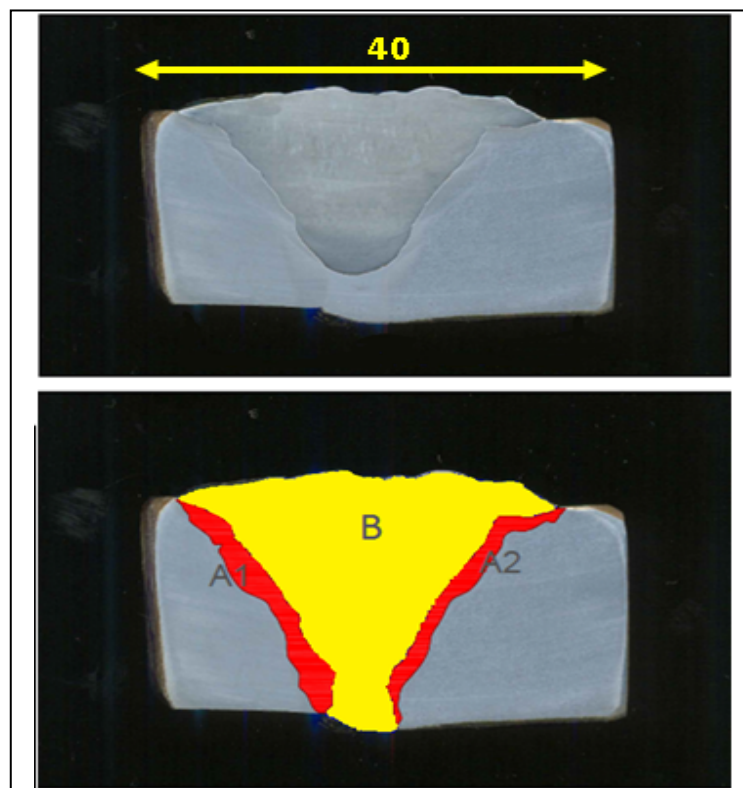


Figura 4.6 – Secção transversal do Corpo-de-prova Soldado com inox.

Através deste ensaio podemos observar a região afetada pelo calor e seu comportamento diferente entre os corpos de prova.

Na peça em que o aço carbono foi usado como metal de adição, mostrou ser mais afetado pelo calor, quando comparado a peça em que foi usada o inox como metal de adição. Tal comportamento se deve ao fato da quantidade de carbono presente na peça em que se tem 100% aço carbono ser maior que na peça em que foi adicionado o inox. Além disso, sabemos que a adição de cromo e níquel apresenta uma resistência elevada ao processo de transferência de calor.

Na Tabela 4.1, podemos inferir que devido às zonas térmicas serem diferentes, tem uma menor diluição para o corpo-de-prova com aço inox do que o em aço carbono. O fato da diluição ser menor, reduz o risco de propagação da trinca nesta região, contribuindo assim, para resistência a corrosão.

Com a imagem acima e juntamente com o software autocad foi possível calcular a área das regiões e com o uso da Eq. (4.1), calcula-se a diluição desta solda e constrói-se a Tabela 4.1.

$$Diluição (\%) = \frac{A_1 + A_2}{((A_1 + A_2) + B)} \quad (4.1)$$

Tabela 4.1 – Valores de Área Fundida, Área Afetada pelo Calor e Diluição.

Corpo-de-prova	Área Fundida (mm)	Área Afetada pelo Calor (mm)	Diluição (%)
Com inox	468,34	115,22	19,74
Sem inox	151,27	86,10	36,27

4.4.2. Análise Química

A composição do corpo-de-prova foi obtida através da análise química com espectrômetro de emissão ótica. A Tabela 4.2 apresenta a composição química média da secção transversal dos corpos de prova.

Empiricamente foi observado que a liga formada tem uma característica levemente magnética, fato comprovado pela utilização de um ímã posicionado sobre a superfície das amostras, o ímã foi levemente atraído, diferentemente, ao metal de base que foi atraído com mais força devido sua composição possuir mais ferro.

Pode-se notar que os valores de Cromo e Níquel estão de acordo com os indicados pelo fabricante, no entanto, os valores de carbono estão acima do descrito pelo mesmo, isso possivelmente possa ser explicado pela solda dissimilar entre aço inox e carbono devido o carbono no momento da soldagem se diluir com parte do metal de base.

Os valores de Cromo estão dentro do especificado pelo fabricante, o mesmo melhora a resistência à corrosão a quente e a resistência à oxidação. Assim como o Níquel é adicionado para estabilizar a estrutura CFC e o molibdênio melhora a resistência a meios corrosivos.

Tabela 4.2 – Resultado Análise Química da zona fundida.

Pontos	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	61,60000	0,07790	0,87300	0,70900	0,01840	0,01540	26,30000	0,16900
2	62,00000	0,09970	1,03000	0,81000	0,01960	0,01350	26,00000	0,15300
3	60,00000	0,09030	1,04000	0,80400	0,02080	0,01200	27,40000	0,16200
4	62,00000	0,09950	0,94400	0,75900	0,01830	0,10300	26,00000	0,14300
Média	61,40000	0,09185	0,97175	0,77050	0,01928	0,03598	26,42500	0,15675
Pontos	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	N
1	9,85000	0,00290	0,05160	0,06020	0,02130	0,01850	0,04700	0,11300
2	9,48000	0,00200	0,04640	0,05970	0,02130	0,01820	0,04700	0,08920
3	10,00000	0,00180	0,05240	0,06000	0,02660	0,01980	0,05160	0,13300
4	8,91000	0,00110	0,04520	0,06180	0,01990	0,01570	0,04860	0,09570
Média	9,56000	0,00195	0,04890	0,06043	0,02228	0,01805	0,04855	0,10773

4.4.3. Microestrutura Na Peça No Aço Carbono

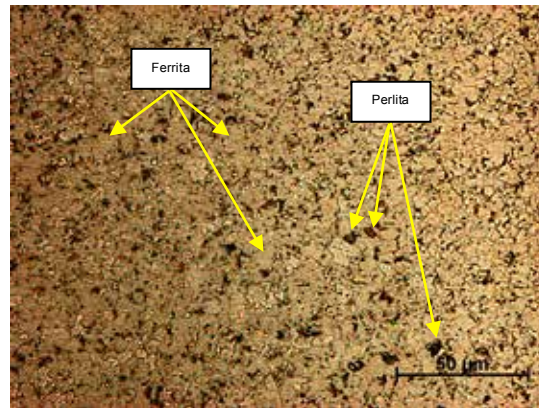


Figura 4.7 – Microestrutura do Metal de Base (Aumento de 100X).

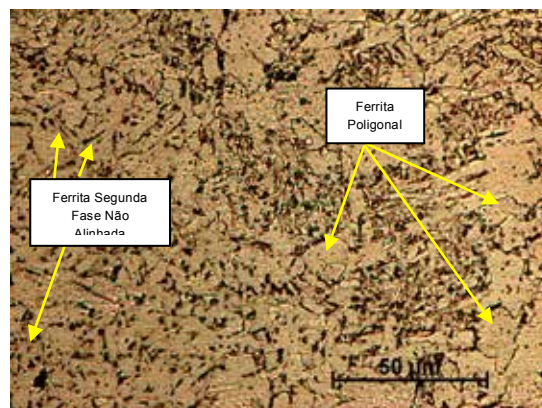


Figura 4.8 – Microestrutura da Zona Termicamente Afetada (Aumento de 100X).

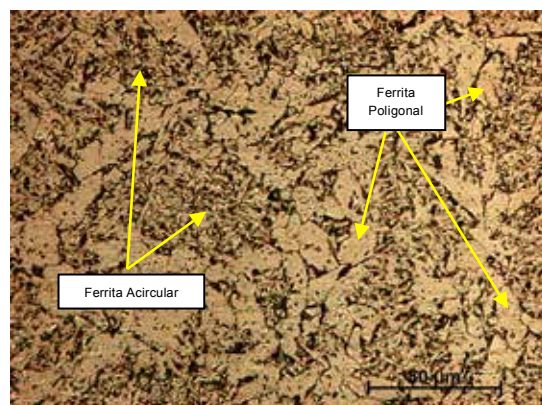


Figura 4.9 – Microestrutura da Zona Fundida (Aumento de 100X).

4.4.4. Microestrutura Solda Eletrodo Aço Inox

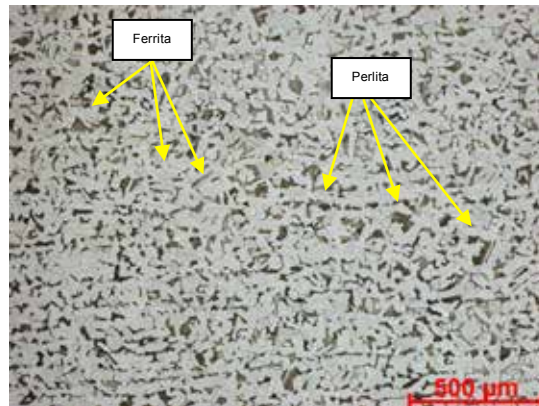


Figura 4.10 – Microestrutura do Metal de Base (Aumento de 100X).

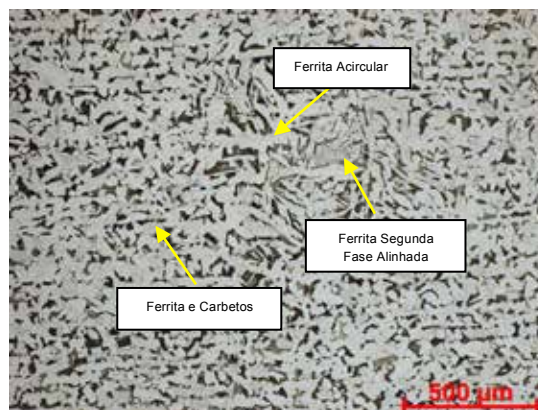


Figura 4.11 – Microestrutura da Zona Termicamente Afetada (Aumento de 100X).

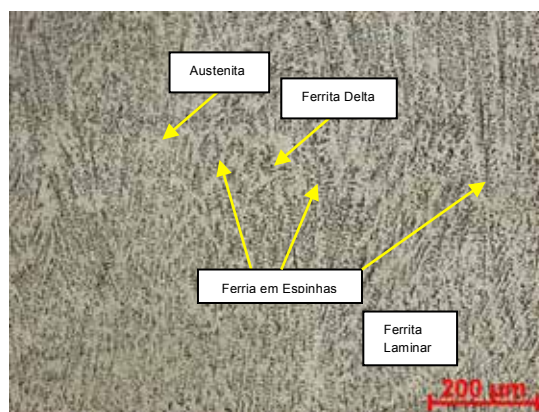


Figura 4.12 – Microestrutura da Zona Fundida (Aumento de 100X).

De um modo geral, não ocorreu alteração no metal de base. Já na zona termicamente afetada e zona fundida surge algumas mudanças na estrutura. Foram encontrados na região termicamente afetada, grãos de ferrita poligonais, além de ferrita de segunda fase não alinhada na peça em aço carbono. Enquanto que na peça de aço inox, além da ferrita poligonal e ferrita segunda fase não alinhada, encontrou-se ferrita e carbeto. Agora a microestrutura no metal de solda é influenciada pela composição química e o ciclo térmico que o metal é submetido.

Segundo MONDENESI (2001), uma solidificação com austenita primária (isto é, na qual a austenita é a primeira fase a solidificar) ocorre para uma relação Cr/Ni inferior a 1,5 e a solidificação com ferrita primária ocorre para maiores relações Cr/Ni. Para valores desta relação superiores a cerca de 1,95 o material solidifica-se totalmente como ferrita. No caso do trabalho em questão temos uma relação de Cr/Ni de 2,76.

Na Figura 4.12 pode-se identificar a formação de Ferrita e Austenita, de acordo com MONDENESI (2001), a Austenita mais Ferrita em Espinhas resulta da solidificação em ferrita primária com formação de austenita tanto nas etapas finais desta como já no estado sólido.

Além da Ferrita em Espinhas pode-se observar a formação da Ferrita Laminar esta segundo MONDENESI (2010), resulta de soldas com elevada quantidade de ferrita ou resfriamentos rápidos. A austenita aparece na forma de lâminas aproximadamente paralelas com a ferrita remanescente localizada entre as lâminas.

4.5. MICRODUREZA

O ensaio de microdureza é um ensaio muito utilizado para realizar a avaliação de materiais, pois esta forma de análise fornece informações sobre mudanças microestruturais locais que ocorrem no metal de solda depositado. Esta prática, segundo a norma AWS B4.0, 2007 (Standard Methods for Mechanical Testing of Welds) é indicada para medir a dureza de soldas de um único passe e multipasse.

Neste estudo foi realizado um comparativo entre a dureza média para o corpo-de-prova sem solda inox e com solda inox, nas regiões do metal de base, zona térmica afetada e metal de solda. Os pontos de análise serão de acordo com a Figura 4.13.

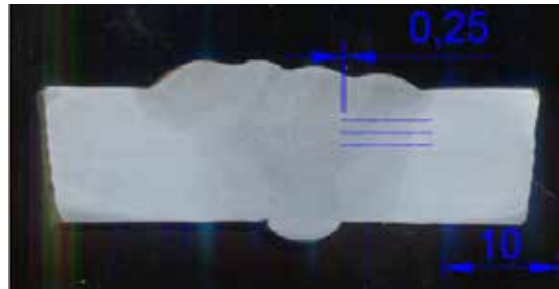


Figura 4.13 - Aspecto da amostra e esquema para medir a microdureza.

Analizando as Figuras 4.14 e 4.15 observa-se uma variação nos valores de microdureza obtidos. Para o corpo-de-prova sem inox (sem adição de níquel), têm-se valores de dureza estáveis, ou seja, não há variações bruscas dos valores do metal de base para do metal de solda, isso confirma a similaridade dos materiais (aço carbono) e pela provável homogeneização da microestrutura, além disso, possibilita identificarmos poucas quantidades de microestruturas com resistência mecânica elevada, como, por exemplo, a Ferrita Acircular (AF).

Já para o gráfico da Figura 4.15, pode-se observar um aumento na dureza no sentido metal de base para o metal de solda, isso pode ser explicado, pela adição de Níquel na solda aumentando assim a ductilidade do mesmo.

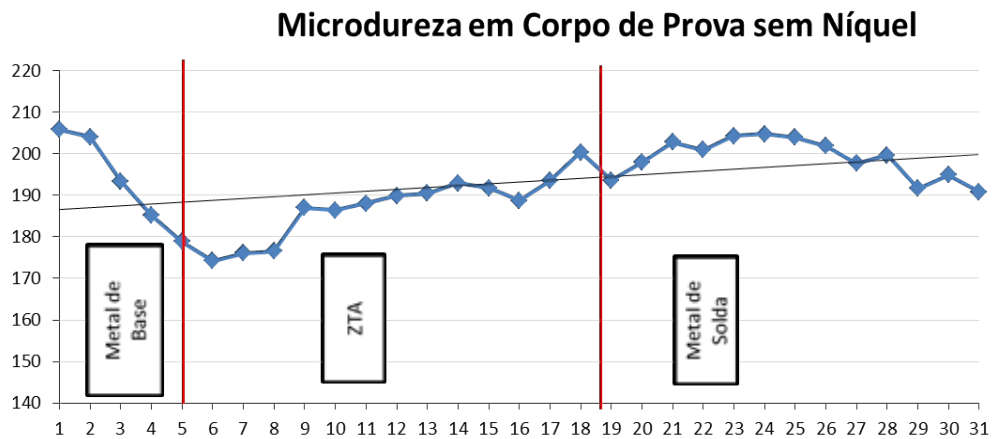


Figura 4.14 – Valores médios obtidos do corpo-de-prova sem adição de Níquel em Vickers.

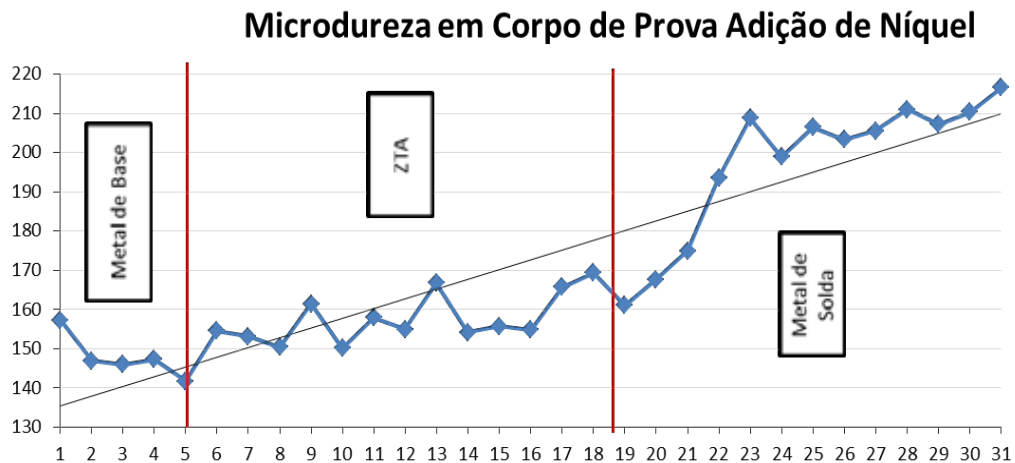


Figura 4.15 – Valores médios obtidos do corpo-de-prova com adição de Níquel em Vickers.

Como o aço inoxidável austenítico não é endurecível por tratamento térmico, mas o é por trabalho a frio, entende-se que os efeitos dos ciclos térmicos da soldagem não afetariam a sua resistência mecânica (QUINTANA, 2005). No entanto, pode-se inferir que as tensões residuais e as deformações inerentes a operação de soldagem tenham, também, uma parcela de contribuição na elevação da dureza observada na região adjacente ao metal de solda.

4.6. AVALIAÇÃO DE CUSTOS

Antes deste trabalho, as juntas destas tubulações eram realizadas através do processo TIG nas soldas de raiz, onde o consumível eram varetas (ER70S-6) e gás era o argônio 100%. Após o termino da solda de raiz, estas eram inspecionadas através de ensaio por liquido penetrante. Já o enchimento e acabamento era usado o processo de eletrodo revestido e o consumível utilizado era o E 7018.

Após esta etapa, preparávamos o alívio de tensão nestas juntas. Solicitando a mobilização da empresa terceirizada que executava este serviço.

A Tabela 4.3 abaixo mostra o custo aproximado que a empresa tinha por ano com intervenções nestas linhas.

Tabela 4.3 – Custo médio/ano da Hydro Alunorte em uma junta de 18” (polegadas), utilizando o antigo processo de fabricação para as peças, ou seja, sem adição de níquel na poça de fusão.

Descrição	Unid.	Quant.(*)	Preço Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Mobilização / Desmobilização (Tratamento térmico)	Unid.	12	1.764,00	R\$ 21.168,00
Serviço de tratamento térmico para alívio de tensão em juntas de 16" a 24"	Unid.	12	205,00	R\$ 2.460,00
Eletrodo revestido E7018	kg	120	9,00	R\$ 1.080,00
Perda de produção para manobra de bateria de trocadores(**), U\$ 49,20/T = R\$ 88,56	Ton	2300	88,56	R\$ 203.688,00
Custo de gás Argônio	m³	4,8	12,00	R\$ 57,60
Disco de desbaste	Pç	24	4,50	R\$ 108,00
Mão de obra (2 soldadores)	Hh	192	7,50	R\$ 1.440,00
Custo com varetas ER70S-6	kg	6	19,00	R\$ 114,00
Soma:				R\$ 230.115,60
(*) Valores referentes a números de paradas durante um ano com o processo de soldagem antigo, considerando uma parada por mês, baseado no histórico da empresa em (2011).				
(**) Quantidade em Toneladas de alumina não produzidas durante um ano devido perdas de produção, considerando uma parada por mês de duas horas.				

Para o cálculo do custo de mão de obra não foi levado em consideração às horas extras e nem adicional noturno. Mesmo sabendo que algumas vezes estas linhas apresentavam problemas nos finais de semana e ainda na madrugada.

O cálculo de custo foi estimado em uma intervenção por mês, lembrando que houve meses em que realizávamos duas intervenções no mesmo período. Porém consideramos para este cálculo a ocorrência mensal.

Com a implementação do eletrodo de inox (E309L-17) na poça de fusão obtivemos um excelente resultado. Tanto em relação à soldabilidade, quanto a resistência a trincas na região soldada.

Além disso, não foi usado alívio de tensão nas juntas onde recebiam eletrodos de inox para sua união.

A Tabela 4.4 abaixo mostra o custo de implementação do novo processo de fabricação.

Tabela 4.4 – Custo médio/ano da Hydro Alunorte em uma junta de 18” (polegadas), utilizando o novo processo de fabricação para as peças, ou seja, com adição de níquel na poça de fusão.

Descrição	Unid.	Quant. (***)	Preço Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Custo de eletrodo revestido E309L-17	kg	10	30,35	R\$ 303,50
Disco de desbaste	Unid.	2	4,50	R\$ 9,00
Mão de obra (2 soldadores)	Hh	16	7,50	R\$ 120,00
Custo de gás Argônio	m³	0,4	12,00	R\$ 4,80
Custo com varetas ER70S-6	kg	0,5	19,00	R\$ 9,50
Soma:				R\$ 446,80
NOTA: Valores referentes a números de paradas durante um ano. Considerando que foi instalado em 2011 e monitorado até 2014 (3 anos), não houve nenhuma perda de produção devido a furo nestas linhas substituídas.				

Com a implantação deste trabalho as linhas de licor cáustico instaladas não mais apresentarem trincas nas uniões soldadas, possibilitou assim, eliminarmos a condição insegura ou risco de projeção de licor cáustico a alta temperatura.

Então, podemos dizer que a utilização deste novo processo de fabricação será replicada onde as condições forem semelhantes e assim, será definido um padrão, onde este estará de acordo com as condições de processos. Tendo em vista a empresa deixou de perder **R\$1.607.681,60** por ano desde 2012. E se corrigirmos este valor para os dias atuais, o mesmo passa para **R\$6.430.726,4** em 4 anos (Até 2015). Uma economia indispensável no mercado atual do alumínio.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

- Zona Térmica Afetada menor para o corpo-de-prova com solda inox em comparação a solda convencional, reduzindo os possíveis efeitos ocasionados pelo aporte térmico nessa região.
- Diluição menor para o corpo-de-prova com inox, reduzindo o quantitativo de carbono que possa vir a modificar as propriedades físicas e mecânicas benéficas contra a ação da corrosão sob tensão;
- Ocorreu o aumento da Zona Fundida e Zona Térmica com o a utilização do aço inox, já o metal de base apresentou a mesma tendência de dureza;
- Os Diagramas de Schaeffler e Delong se mostram ótimas ferramentas na predição dos valores de ferrita delta e dos microconstituintes que o corpo-de-prova com inox apresentaria;
- Através deste trabalho foi possível melhorar a segurança de mantenedores e operadores da área da digestão da Hydro Alunorte. Já que eliminou a possibilidade de trinca e consequentemente a projeção de licor cáustico aquecido por estas juntas;
- Melhoramos o aspecto visual da área operacional, já que não temos pontos com vazamentos, ou seja, área operacional está mais limpa;
- Redução dos custos com serviços de manutenção: como horas extras, devido antes trabalharmos geralmente com corretivas; gastos elevados com refeições e transporte;
- Aumento da confiabilidade das linhas soldas com inox, devido termos eliminado os furos provenientes destas juntas;
- **Evitou-se um gasto de R\$ R\$6.430.726,4** com intervenções em um acumulado de 4 anos (até 2015);
- Assim, podemos inferir que este trabalho nos trouxe como retorno diversos ganhos, como: uma maior a segurança, um menor custo e uma maior disponibilidade para produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM E165, “Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination: Annual Book of ASTM Standard”, United States of America, 2004.

AWS B4.0, 2007 (Standard Methods for Mechanical Testing of Welds).

AWS. B1.11, “Guide for the Visual Examination Of Welds” United States of America, 2000.

BAULY, J. C. “Caracterização Microestrutural e Propriedades de Juntas Dissimilares entre Aços Inoxidáveis Fabricadas por Processo de Fusão”. 2000. 112f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

BOTT, I. de S.; RIOS, P. R. “On the effectiveness of inclusions as nucleation sites in weld deposits”. *Scripta Materialia*, v. 38, n. 8, pp. 1269-1274, 1998.

BRAGA, E. M. “Efeito do Nitrogênio nas Trincas de Solidificação em Soldas de Aço Austenítico”. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica Área de Concentração: Fabricação) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

Brandi, S. D.. “Soldagem dos aços inoxidáveis” – Publicação da Acesita – dezembro de 1997.

CALLISTER, JR., W. D. “Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução”. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 7 ed. 2008, 473p.

CRUZ, Jr. *et al.*, “Parâmetros Otimizados para Revestimento de Chapas de Aço Carbono pelo Processo MIG-DWOA com Arame ER 308LSI”, *XXXV CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem - CONSOLDA*, Piracicaba, Brasil, 26-29 Outubro, 2009.

ESAB, ‘Soldagem com Eletrodo Revestido’, Revisão 33. Publicado em Jul./2011. Acessado em 11/05/2012.

Farias, J. P. “Magnésio metálico como componente do revestimento na soldagem com eletrodos ao C-Mn-Ni”. Tese de D. Sc. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, Brasil, 1985.

FERNANDES, J. C. “Desenvolvimento de um Dispositivo Tipo Carga Constante para Avaliação da Susceptibilidade à Corrosão Sob Tensão de Aço Inoxidável Austenítico”. Abril 2010.

GEMELLI, E. “Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização”. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1 ed. 2001, 68, 70.

GENTIL, V. “Corrosão”. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 6 ed. 2011, 158p.

GLOWNIA, J., KALANDYK, B., HÜBNER, K. , “Delta ferrite predictions for cast duplex steels with high nitrogen contents”, *Materials Characterization*, Vol. 47, 2001, pp. 149-155.

KOTECKI, D. J., “Metalurgia de la soldadura de los aceros inoxidables”, Fundación Latinoamericana de Soldadura, Apostila, 1990, 246p

KOTECKI, D.J., “Molybdenum effect on staniless steel weld metal ferrite”, IIW Document II-C-707-83. (1983).

KOTECKI, D.J., “Silicon effect on staniless steel weld metal ferrite”, IIW Document II-C-779-86. (1986).

LEE, T.-K. et al. “Effect of inclusion size on the nucleation of acicular ferrite in welds”. ISIJ International, v. 40, n. 12, pp. 1260-1268, 2000.

Machado, I. G. “Soldagem e Técnicas Conexas: Processos”. 1a edição Porto Alegre, RS editado pelo autor, 1996.

MONDENESI, P. J. “Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis”. Livro, Osasco, 2001.

MONDENESI, P. J.; MARQUES P. V. “Soldagem I: Introdução aos Processos de Soldagem”. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

NUNES, L. P. “Relatório Técnico de Avaliação de Problemas de Corrosão em Permutadores de Calor e Tubulações”. Rio de Janeiro: IEC – Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda. 20 dez. 2007. p.10-12.

OHNISHI, K., WATANABE, R., CHIBA, R., MURAI, M., “Proceedings of the second international congress of hydrogen in metals”, 1977, Pergamon Press. PSYS/HYDRO-Alunorte, 2014.

QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. “Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico”. Livro, EDEME, Florianópolis, 1979.

REED-HILL, R. E. “*Princípios da Metalurgia Física*”, 2ª Ed., Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S.A, 1982.

SILVA, F. G., *E”studo da Viabilidade do Processo FCAW com adição de arame Frio Aplicado a Indústria Naval”*, M.Sc., Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

TAVARES, C. F., “*Influência da Composição Química e da Espessura da Peça Fundida na Quantidade e Distribuição de Ferrita Delta em Aços Inoxidáveis Austeníticos*”, M.Sc., Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2008.

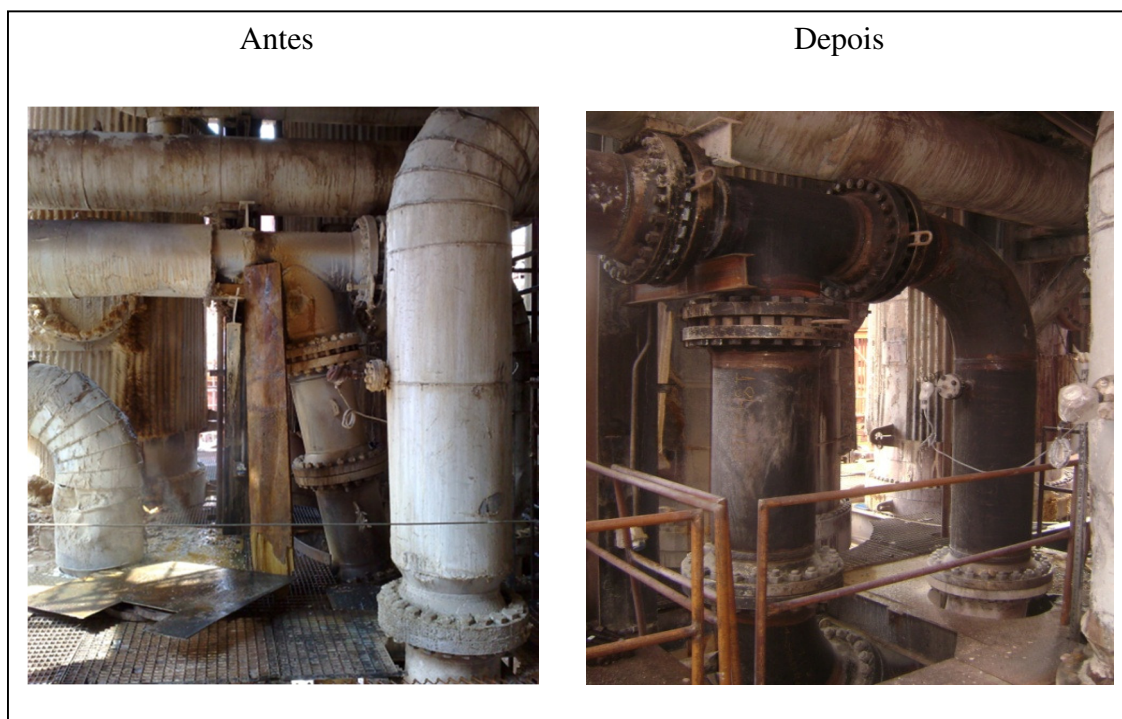
TELLES, P. C. S. “Vasos de Pressão”. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2 ed. atualizada. 2010, 69p.

VIC, Aços. Composição química para aços ABNT/SAE. Disponível em: <http://www.acosvic.com.br/tabelas/tabela_01.pdf>. Acesso em: 13 de jun. de 2009.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F. D. H. Soldagem - Processos e Metalurgia. Editora Edgar Blucher Ltda. 494p. 1992.

ANEXO

As imagens abaixo mostram um trecho de tubulação (antes e depois) onde este trabalho foi realizado (na área 04A, digestão) da Hydro Alunorte.



Saída do trocador para o digestor (Hydro, 2015)